

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4 — 1972

УДК 551.465

Л. В. ПОБОРЧАЯ, В. П. ЧИЖОВ

НАБЛЮДЕНИЕ СУСПЕНЗИОННОГО ПОТОКА В РИЖСКОМ ЗАЛИВЕ

Выполнены измерения полей скорости и плотности в придонной области Рижского залива (аппаратура и методика разработаны авторами). В восточной части залива обнаружены суспензионные потоки. Количественно определены их основные динамические характеристики. Сравнение измеренных величин с результатами расчета дало удовлетворительное согласие.

Суспензионные потоки наблюдаются в океанах, морях и водохранилищах. Они играют важную роль в донных отложениях, в формировании рельефа дна и определяют динамику придонного водного слоя водоемов. Изучение суспензионных потоков необходимо для геофизических, геологических и инженерно-геологических исследований, в частности для решения таких задач, как борьба с заносимостью акваторий портов, морских судоходных каналов и водохранилищ. Известно несколько причин возникновения суспензионных потоков: вынос взвесей в море водами рек, волнения на мелководье, подводные землетрясения и оползни на материковых склонах [1]. В данной работе рассматриваются суспензионные потоки, возникшие в результате первой причины в прибрежных водах при сравнительно малых глубинах. Изучение суспензионных потоков ведется в природных условиях, в лабораторном эксперименте, делаются также попытки математического описания этого процесса [1]. Однако наблюдений над суспензионными потоками в природе выполнено очень мало и они в основном носят качественный характер.

Суспензионный поток представляет собой неустановившееся неравномерное движение стратифицированной по плотности тяжелой вязкой несжимаемой жидкости. Он течет в окружающей чистой воде обособленной массой под действием гравитационной силы. Определяющими параметрами суспензионного потока являются плотность и скорость течения, находящиеся в прямой связи с уклоном дна, по которому он движется, и с источником его возникновения.

Наблюдения суспензионного потока в природе связано с большими трудностями: прежде всего, с необходимостью работать в придонной области водоемов, а также с отсутствием аппаратуры для измерения параметров этого потока.

В Рижском заливе с борта экспедиционного судна «Геофизик» нами проведены измерения полей скорости и плотности суспензионного потока в природных условиях и изучен характер их движения. Методи-

ка измерений и аппаратура разработаны нами. Измерения проведены при отсутствии волнения. Плотность суспензионного потока определяли посредством измерения мутности фотометром на фотодиоде ФД-1 с интегральной чувствительностью 20 ма/лм и постоянной времени 10^{-5} сек . Точность измерения плотности в испытанных суспензиях в зависимости от механического состава илов и их плотности была 2—8%. Скорость придонного течения измеряли нестандартной чашечной вертушкой, на одной из чашек которой была прикреплена пластинка из медной фольги, перекрывавшая при вращении вертушки поток света от осветителя на фотодиод с частотой, пропорциональной скорости потока жидкости. Порог чувствительности вертушки $1,5 \text{ см/сек}$, точность измерения скорости повышалась от 10% при 15 см/сек до 3% при 100 см/сек . Попутно измеряли среднюю температуру придонного слоя водоема термометром сопротивления на термисторе МТ-54. Датчик и осветитель были укреплены на двух параллельных жестко связанных между собой платформах, которые двигались по вертикальным направляющим градиентной мачты, опускаемой на дно с борта судна на просе. Сигналы от датчиков по кабелю поступали на шлейфы осциллографа и фиксировались на осциллограмме. Расшифровка полученных записей производилась по соответствующим тарировочным кривым. В поисках суспензионного потока на акватории Рижского залива было выполнено десять станций. На каждой станции измерения вели на пяти горизонтах в 15, 35, 60, 80 и 110 см от основания градиентной мачты.

По данным выполненных измерений получено распределение по вертикали скорости, плотности и температуры. Откуда следует, что в западной части Рижского залива (станции 1—4) у дна наблюдалось очень слабое течение чистой воды (при скорости 5—12 см/сек). Суспензионные потоки были обнаружены на станциях 6—9 и на станции 10 в восточной части Рижского залива.

На станциях 6—9 обнаружен суспензионный поток в спутном потоке чистой воды (см. рисунок), как результат выноса взвесей водами р. Пярну. Наличие максимума в вертикальном распределении скорости суспензионного потока (рис., а) свидетельствует о том, что суспензия текла с большей скоростью, чем окружающая ее чистая вода. Течение суспензии затухало по мере удаления от устья р. Пярну. Если на станции 9 в 4,3 км от устья реки максимальная скорость суспензионного потока была 100 см/сек , а средняя скорость — 83 см/сек , то на станции 6 на расстоянии 78 км от устья реки максимальная скорость составляла всего 16 см/сек , а средняя — 12 см/сек .

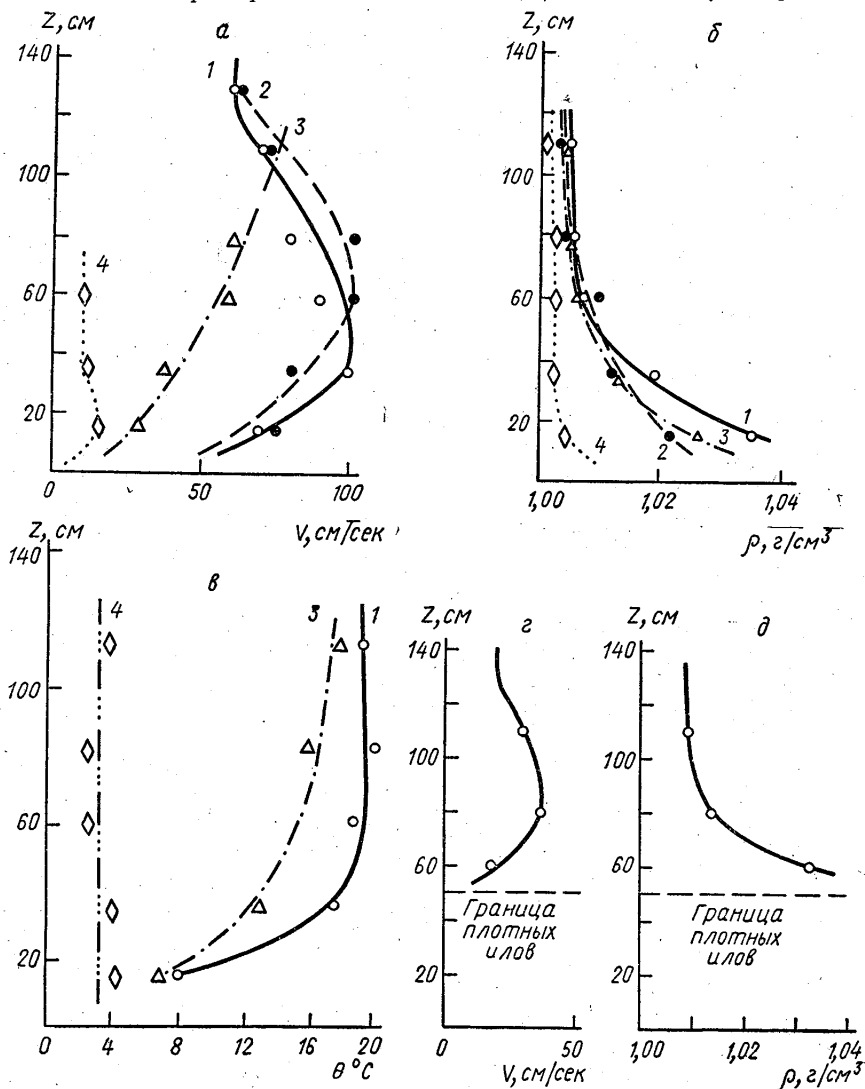
Плотность суспензии при максимуме у дна убывала к поверхности потока (рис., б). Вдоль потока плотность суспензии также убывала от $1,035 \text{ г/см}$ на станции 9 до $1,001 \text{ г/см}$ на станции 6. Толщина суспензионного потока увеличивалась от устья реки до станции 8, на протяжении 8 км за счет большой скорости потока суспензии и интенсивного турбулентного обмена с окружающей чистой водой, до 110 см. Далее вдоль потока толщина его уменьшалась и на станции 6 составляла всего 35 см. На расстоянии около 110 км от места возникновения суспензионный поток прекратил свое существование.

Происходила сепарация взвесей по крупности: пески выпадали из суспензионного потока в осадок на первых километрах, а более мелкие взвеси постепенно осаждались по всей длине потока.

Слой суспензии, обнаруженный на станции 10, двигался по слою более плотного ила с максимальной скоростью 38 см/сек (рис., г) при максимальной плотности $1,0325 \text{ г/см}^3$ (рис., д) достигая толщины 75 см. Источником этого суспензионного потока, по-видимому, служи-

ли взвесенесущие воды рек, сносимые на восток дрейфовым поверхностным течением в Рижском заливе.

Характер движения наблюдаемых суспензионных потоков на станциях 6—9 и 10 и распределение донных отложений на пути прослежен-



Вертикальное распределение измеренных параметров. *a* — скорости (кривые проведены по расчетным данным, точки — данные измерений): 1—на станции 9, 2—на станции 8, 3—на станции 7, 4—на станции 6; *б* — плотности по данным измерений и *в* — температуры по данным измерений. Обозначения те же; *г* — скорости по данным измерений на станции 10 и *д* — плотности на станции 10

ного потока суспензии согласуется со сведениями морских геологов о распределении донных осадков [2] и определяется спецификой метеорологических условий [3] в Рижском заливе.

Измеренные в Рижском заливе поля скорости и плотности суспензионных потоков качественно согласуются с аналогичными результатами лабораторного эксперимента [4].

По полученным натурным данным нами проведена проверка существующего математического описания движения суспензионного потока, основанного на материалах лабораторных экспериментов [5—8].

Выполнен расчет вертикального распределения скорости в суспензионном потоке по формулам Бонфиля и Годэ [5] для собственно суспензионного слоя толщиной от дна ($z=0$) до высоты максимальной скорости ($z=z_{v\max}$)

$$v_0 = v_{0\max} (z/z_{v\max})^{n-1},$$

где $n = f(v_{cp})$ и для слоя смешения высотой от нуля до границы «суспензия—вода»

$$v_i = v_{\max} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - z_{v\max}}{h - z_{v\max}} \right) \right],$$

где h — толщина суспензионного потока.

Как видно на рисунке, данные измерений (точки) согласуются с расчетными кривыми распределения скоростей в суспензионном потоке по вертикали с точностью ± 9 —17%.

Расчеты средних на вертикали величин плотности для выполненных станций сделаны по формуле Поборчей [6]:

$$\rho_{cp} = 0,43 \rho_{\max} + 0,57 \rho_0,$$

где ρ_0 — плотность чистой воды.

Сравнение результатов расчета со средними величинами плотности по данным измерений свидетельствует об их согласии (см. табл.).

Нами получена эмпирическая связь между максимальной и средней скоростями движений суспензии $v_{\max} = 1,22 v_{cp}$ и высоты максимальной скорости с толщиной слоя суспензии

$z_{v\max} = 0,42 \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} h$. У Кулеша [7] для лабораторного эксперимента эти величины определяются, как

$$v_{\max} = 1,16 v_{cp} \text{ и } z_{v\max} = 0,62 h.$$

Изменение толщины суспензионного потока по его длине рассчитано по формуле Леви и Кулеша [8]:

$$\frac{dh}{dx} = Aq^2 \frac{\gamma' I - \left(\lambda_0 + \lambda_i \frac{H}{H-h} \right)}{g\gamma' h^3 - 1,3 q^2},$$

где $A = 10^{-3}$, x — ордината вдоль потока, q — удельный расход жидкости, $\gamma' = \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0}$ — относительный удельный вес жидкости, γ — удельный вес суспензии, γ_0 — удельный вес воды, I — уклон дна, H — полная глубина водоема, $\lambda_0 = 0,005$ — коэффициент сопротивления на гладком дне (ил, глина), $\lambda_i = 0,003$ — коэффициент сопротивления на границе раздела «суспензия—вода», g — ускорение силы тяжести. Расхождение между расчетными и измеренными величинами составляет $\sim 20\%$.

Средняя скорость и глубина суспензионного потока рассчитаны по формуле Леви [9] с введением числовых коэффициентов в соответствии с натурными условиями:

Расхождение между рассчитанными и измеренными величинами средних скоростей составляет $\pm 9\%$, глубин — $\pm 7\%$.

Анализ параметров суспензионного потока показал удовлетворительное согласие расчетных величин с измеренными. Это свидетельствует о возможности использования в первом приближении существующего математического списания при расчетах параметров суспензионного потока в натуральных условиях.

$$v_{\text{ср}} = \left[B \frac{g l \gamma' q}{\lambda_0 + \lambda_i \frac{H}{H_i - h}} \right]^{1/3} \quad \text{при } B = 60$$

и

$$h = \left[c q^2 \frac{\lambda_0 + \lambda_i \frac{H}{H - h}}{g l \gamma'} \right]^{1/4} \quad \text{при } c = [см]$$

Одновременно с измерением распределения по вертикали скорости и плотности в придонном слое Рижского залива были выполнены измерения средней температуры на вертикалях станций 6—9 (рис., в). Эти данные показали, что с удалением от устья р. Пярну температура придонного слоя понижается в связи с увеличением глубины и постепенным охлаждением суспензионного потока, возникшего из теплых взвесенесущих вод реки. Например, на станции 9 при глубине водоема $H=6$ м на высоте 15 см от дна температура была 8°C , а в 60 см от дна и выше — 20°C и оставалась постоянной до поверхности водоема в связи с интенсивным турбулентным обменом, обусловленным высокими скоростями течения. На станции 7 при $H=9,3$ м в 120-сантиметровом придонном слое наблюдался градиент температуры до 11°C , при минимальной температуре 7°C . А на станции 7 при $H=27,5$ м во всем придонном слое толщиной в 120 см температура оставалась постоянной и равной 4°C .

В северо-восточной и в восточной части Рижского залива были обнаружены суспензионные потоки.

Наблюдавшийся суспензионный поток двигался в спутном потоке чистой воды. По мере удаления от места возникновения его максимальная скорость убывала от 100 см/сек (станция 9) до 16 см/сек (станция 6), соответственно убывала средняя скорость от 83 до 13 см/сек. Плотность суспензии ρ_{max} уменьшалась на том же расстоянии от 1,035 до 1,010 г/см³. Толщина потока убывала от 1,2 до 0,35 м. Таким образом, наблюдавшийся суспензионный поток имел затухающий характер.

Расчеты параметров суспензионного потока, выполненные по существующим формулам, дали в основном удовлетворительное согласие с измерениями в природных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поборчая Л. В. «Океанология», 2, вып. 5, 1962.
2. Горшкова Т. И. Труды НИИ рыбного хозяйства, т. 3, изд. АН ЛатвССР, 1961.
3. Справочник по климату СССР, вып. 5, Литовская ССР, ч. 31, Ветер. Л., Гидрометиздат, 1966.
4. Поборчая Л. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., № 2, 1967.
5. Bonnefill R., Goddet J. Etude des courants de densite en canal. Communication presentee au VIII Congres de l'IAHR. Montreal, 1959.
6. Поборчая Л. В. «Метеорология и гидрология», № 3, 1967.
7. Кулеш Н. П. «Изв. вузов», строительство и архитектура № 8. Новосибирск, 1959.
8. Леви И. И., Кулеш Н. П. Труды ЛПИ, гидротехника, № 10, 1960.
9. Леви И. И. «Известия ВНИИГ», т. 62. М.—Л., Главэнергострой, 1959.

Поступила в редакцию
26.2 1971 г.

Кафедра
физики моря и вод суши