ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЕЙ ПЛОТНОСТИ В ГЛУБОКОВОДНОМ ФАКЕЛЕ СТОЧНЫХ ВОД

Ф.Ш.Ахмедов

НИПИ "Суканал",
AZ 1012, Баку, Тбилисский просп., 67

В статье рассмотрены вопросы, связанные с глубоководными факелами сточных вод, составлена математическая модель распределения разности плотностей морской и сточной вод в глубоководном факеле сточных вод и установлены их граничные условия. Решая поставленную задачу, была найдена закономерность распределения разности плотностей морской и сточной вод на оси факела. Получено выражение для вертикальной компоненты коэффициента диффузии. Определена высота подъема факела с учетом плотностей морской и сточной вод, разности плотностей, расхода сточных вод и конструктивных параметров выпуска. Полученные результаты имеют практическое значение при определении параметров глубоководных выпусков сточных вод, применяемых для защиты поверхностных слоев воды и прибрежной зоны моря от загрязнения.

Для изучения глубоководных факелов сточных вод необходим прогноз качества воды в его окрестности. Для этого необходимо иметь определенные данные и учитывать: 1) плотностную стратификацию воды; 2) поле осредненных скоростей; 3) дисперсию сточных вод; 4) процессы превращений примесей воды.

Глубоководные факелы сточных вод в отличие от прочих обладают определенной особенностью, которая заключается в том, что факел сточных вод поднимается к поверхности водоема не только вследствие турбулентной диффузии, но и из-за разности в плотностях так называемой "плавучести" сточной воды.

Существующие методы проектирования глубоководных выпусков сводятся к определению зоны, где $\rho_{CT} \neq \rho_M$, ρ_{CT} и ρ_M – соответственно плотности сточной и морской вод (Кривченко, 1979).

Трудность прогноза качества воды в окрестностях глубоководного выпуска заключается в том, что вследствие всплывания "легкой" жидкости в окрестностях выпуска возникает сложное течение, учет которого весьма затруднителен.

Поэтому для решения задачи распределения примесей воды необходимо иметь достаточно надежный прогноз распределения плотности воды.

Если рассматривать плотность, как некоторую неконсервативную субстанцию, то ее прогноз в условиях стратифицированного по плотности моря, как можно показать(Ибад-заде, Ахмедов, 1994), сводится к решению уравнения:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \vec{\upsilon}\ \ grad\,\bar{\rho} = div(D \cdot grad\,\bar{\rho}), \quad (1)$$

где $\vec{\rho}$ - дефицит плотности, определяемый выражением:

$$\bar{\rho} = \rho_M(z) - \rho_{CT}(x, y, z, t), \quad (2)$$

$\rho_M(z)$ - распределение плотности морской воды по глубине; ρ_{CT} (x,y,z,t) - распределение плотности в факеле сточных вод (рис.1). $\vec{\upsilon}_{\rho}$ - вектор скорости, D – коэффициент дисперсии, представляющий собой в общем виде тензор второго рода.

Соответствующие компоненты тензора коэффициента дисперсии определяются выражением:

$$D = D_T + D_\rho$$
$$\vec{\upsilon} \equiv 0\,. \quad (3)$$

Величина $D\rho$ представляет собой часть вертикальной компоненты тензора дисперсии, связанной с переносом жидкости, обусловленным разностью плотностей, а величина D_T - перенос, определяемый дисперсией в турбулентном осредненном потоке, существующем в море независимо от наличия факела сточных вод. Аналогичным образом определяются горизонтальные компоненты тензора коэффициента дисперсии.

Начальные и граничные условия, необходимые для решения уравнения (1), имеют вид:

$$\begin{aligned}
&\text{При } t=0 \quad \bar{\rho}=\bar{\rho}\,(x,y,z,o).\\
&\text{При } /x/\to\infty \qquad \bar{\rho}=o. \qquad\qquad (4)\\
&\text{При } z=o \quad \partial\bar{\rho}/\partial z=\varphi(x).\\
&\text{При } z=H \quad \partial\bar{\rho}\,/\,\partial z=-\delta\,\bar{\rho}.
\end{aligned}$$

Здесь: H- глубина водоема в месте выпуска сточных вод; δ - коэффициент, определяемый процессом теплообмена между водоемом и атмосферой; $\varphi(x)$ - непрерывная функция, определенная для точек, /x/≤B.

В условиях плоской задачи уравнения прогноза распределения дефицита плотности (1) представим в виде:

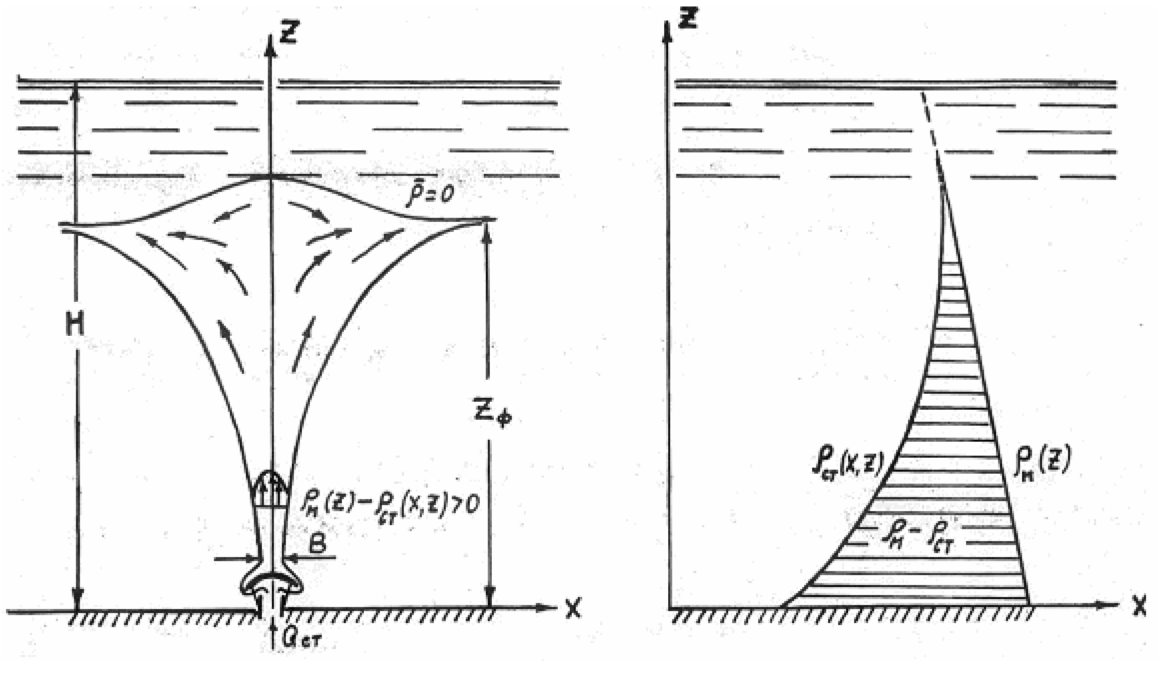
$$\frac{\partial\rho^{-}}{\partial t}+V_{z}\frac{\partial\rho^{-}}{\partial z}-\frac{\partial}{\partial x}\left(Dx\frac{\partial\rho^{-}}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(Dz\frac{\partial\rho^{-}}{\partial z}\right)=0. \quad (5)$$

При этом мы делаем допущение о том, что перенос и уменьшение дефицита плотности происходит только в направления оси Z при турбулентной диффузии в плосткости XZ и вертикальная составляющая скорость погашена полусферическим отражателем, υ_Z=0 (рис. 1) .

В условиях осисимметричной задачи уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD_{r\rho}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}D_{z\rho}\cdot\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial z}=0 \quad (6)$$

где r - радиальная координата



Факел сточных вод и распределение плотности в воде

$\rho_{ст}(\chi,Z)$ - распределение плотности по оси факеля
$\rho_м(Z)$ - распределение плотности по глубине моря
$\rho=\rho_м-\rho_{ст}$ - распределение дефицита плотности

В этом случае граничные условия на дне получают вид:

$$/r/\leq B/2 \quad \frac{\partial \rho^-}{\partial z} = -\frac{4Q_{CT}\,\bar{\rho}_{CT}}{\pi B^2 D_{zp}} \qquad (7)$$

$/r/\geq B/2 \quad \frac{\partial \rho^-}{\partial z} = 0$, где, $Q_{ст}$ – расход сточной воды, B- начальное (сжатое) сечение факела (рис.). Сжатое сечение факела определяется выражением(Ахмедов, 1999):

$$B = \alpha d_0 \sqrt{\frac{\rho_{cm}}{\rho_м - \rho_{cm}}}, \qquad (8)$$

где, α-безразмерная постоянная величина, определяется по результатам экспериментальных исследований (таблица).

Осредняя результаты разных опытов, получим: α=0.05.

Для решения уравнения (1) необходимо знать вид функции или иметь уравнение, связывающее величины D и ρ^-.

При определении вертикальной компоненты $Dz\bar{\rho}$ предположим, что она зависит от дефицита плотности в данной точке $\bar{\rho}$, характерного дефицита плотности воды у дна моря (или начального дефицита плотности) $\bar{\rho}_0$, высоты подъема факела $Z_ф$ и ускорения свободного падения g. Тогда согласно "II" теореме и соображениям теории размерностей получим:

$$D_{z\rho} = \gamma \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_0} Z\phi \sqrt{gZ_\phi}, \qquad (9)$$

где γ- безразмерный коэффициент, учитывающий прочие факторы;

При определении параметра γ следует иметь в виду, что поскольку "легкие" частицы не могут опускаться, то при

$$\frac{\partial \rho^-}{\partial z} \rangle 0 \quad \gamma\equiv 0 \qquad (10)$$

и при $\frac{\partial \rho^-}{\partial z} \leq 0 \quad \gamma=\gamma_1$.

Для определения коэффициента γ (или γ_1) можно воспользоваться осисимметричным экспериментом с имитаторами сточной воды (V_x=0) либо натурными данными в аналогичных условиях.

В квазистационарном случае $(\partial \bar{\rho} / \partial t = 0)$ и в цилиндрических координатах уравнение (6) имеет вид:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r D_{rp} \frac{\partial \rho^-}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z} D_{z\rho} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} = 0 \qquad (11)$$

На оси симметрии r=0 и $\partial \bar{\rho} / \partial r = 0$, при этом уравнение (11) имеет вид:

$$\frac{d}{dz} Dz\rho \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} = 0, \qquad (12)$$

откуда:

$$D_{z\rho} \cdot \frac{d\bar{\rho}}{dz} = C_1, \qquad (13)$$

где C_1- произвольная постоянная, определяется из условий (7).

С учетом этого получим:

$$D_{z\rho} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{z}}\Big|_{z=0} = -\frac{4Q_{CT}\,\bar{\rho}_{CT}}{\Pi B^2}. \qquad (14)$$

Из выражений (13) и (14) видно, что

$$C_1 = -\frac{4Q_{CT} \cdot \bar{\rho}_{CT}}{\Pi B^2}. \qquad (15)$$

Пренебрегая на оси симметрии вертикальной турбулентной составляющей тензора дисперсии D_{zT}, т.е. считая при r=0, Dz=Dzρ, а также учитывая при r=0 всегда $\partial \rho^- / \partial z \langle 0$, из выражений (9; 13;15) получим:

$$\gamma \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{CT}} Z_\phi \sqrt{gZ_\phi} \frac{d\bar{p}}{dz} = -\frac{4Q_{CT}\bar{\rho}^2{}_{CT}}{\pi B^2}, \qquad (16)$$

Результаты экспериментальных исследований и значений коэффициентов α и n

Серия опытов	№№ опы-тов	Дефицит плотности – $\rho, г/см^3$	Расход сточных Вод $Q_{СТ}$, см³/с	Высота подъема факела сточ.вод Zф, см	Ширина сжатого сечения факела, B, см	Коэф-фициент α	Коэффи-циент n	Примечания
I	1	0.01	0.5	вых.пов	0.26	0.052	-	Плотность сточ. воды $\rho_{СТ}$=1.0 г/см³.
	2	0.008	0.5	40	0.28	0.051	983	
	3	0.006	0.5	31	0.050	0.050	1300	Диаметр насадки d_H=0.5 см
	4	0.004	0.5	15	0.40	0.051	1536	
	5	0.002	0.5	3.6	0.56	0.052	1416	Диаметр отражателя
	6	0.001	0.5	1.0	0.80	0.051	1638	d_0=0.5 см
II	1	0.01	0.5	5.2	0.50	0.050	1300	$\rho_{СТ}$=1 г/см³.
	2	0.008	0.5	3.4	0.56	0.049	1337	d_H=0.5 см
	3	0.006	0.5	2.0	0.64	0.050	1342	d_0=1 см
	4	0.004	0.5	1.0	0.74	0.048	1199	
	5	0.002	0.5	0.3	1.0	0.048	1200	
	6	0.001	0.5	0.1	1.3	0.047	1142	
III	1	0.01	1.5	41	0.52	0.05	1332	$\rho_{СТ}$=1 г/см³.
	2	0.008	1.5	32	0.57	0.05	1501	d_H=0.5 см
	3	0.006	1.5	17	0.65	0.05	1348	d_0=1 см
	4	0.004	1.5	11	0.76	0.048	1631	
	5	0.002	1.5	2.2	1.12	0.049	1538	
	6	0.001	1.5	0.6	1.5	0.047	1350	
IV	1	0.01	2.0	60	0.57	0.052	1583	$\rho_{СТ}$=1 г/см³.
	2	0.008	2.0	54	0.58	0.05	1527	d_H=0.5 см
	3	0.006	2.0	32	0.67	0.05	1612	d_0=0.5 см
	4	0.004	2.0	16	0.80	0.048	1638	
	5	0.002	2.0	3.7	1.1	0.049	1754	
	6	0.001	2.0	1.0	1.5	0.047	1265	
V	1	0.01	1.0	6.0	0.7	0.047	1440	$\rho_{СТ}$=1.000 г/см³.
	2	0.008	1.0	3.0	0.8	0.053	1228	d_H=0.5 см
	3	0.006	1.0	1.6	1.0	0.052	1600	d_0=1.5 см
	4	0.004	1.0	0.9	1.2	0.051	1866	
	5	0.002	1.0	0.2	1.6	0.049	1310	

Решая это уравнение, получим:

$$\frac{1}{2}\bar{\rho}^2 = -\frac{4Q_{CT}\cdot\bar{\rho}^2}{\gamma\pi B^2}\cdot\frac{Z}{Z\phi\sqrt{gZ_\phi}} + C_2\ , \quad (17)$$

где C_2- постоянная интегрирования.

Из условия Z=0; $\bar{\rho} = \bar{\rho}_{CT}$ получим:

$$C_2 = \frac{1}{2}\bar{\rho}^2{}_{CT}\ .$$

С учетом этого выражения (17) будет иметь вид:

$$\bar{\rho}^{2} = \bar{\rho}_{CT}^{2}\left(1 - \frac{8Q_{CT}\cdot Z}{\gamma\pi B^2 Z_\phi\sqrt{gZ_\phi}}\right). \quad (18)$$

Выражение (18) представляет собой распределение дефицита плотности на оси Z в осисимметричном случае.

При проектировании глубоководных выпусков большое значение имеет определение возможной высоты подъема и оценка условий затопления факела сточных вод. Зависимость (18) дает возможность решить эту задачу. Она определяются условиями: $\bar{\rho}=0$ и Z=Zф≤H. Из выражения (18) в случае $\bar{\rho}=0$ получаем:

$$Z\phi = \frac{64}{\gamma^2\pi^2}\cdot\frac{Q_{CT}^2}{gB^4} = \frac{n}{g}\cdot\frac{Q_{CT}^2}{B^4}\ , \quad (19)$$

где $n = \dfrac{64}{\gamma^2\Pi^2}$ - постоянная величина.

Ее можно определить по данным экспериментов, приведенных в таблице. Обработка данных, приведенных в упомянутой таблице, определила среднее значение величины n равным 1450. С учетом этого в выражении (19) высота подъема факела сточных вод будет:

$$Z\phi = \frac{1450}{g}\cdot\frac{Q_{CT}^2}{B^4}\ . \quad (20)$$

Зная n, определяется коэффициент γ из выражения:

$$\gamma = \sqrt{\frac{64}{n\pi^2}} = \sqrt{\frac{64}{1450\cdot 3{,}14^2}} \approx 0{,}066\ .$$

С учетом последнего (9) получит вид:

$$Dz\rho = 0{,}066\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{CT}}Z_\phi\sqrt{gZ_\phi}\ . \quad (21)$$

Зная распределение дефицита плотности $\bar{\rho}$, по формуле (18) определяется распределение вертикальной компоненты коэффициента дисперсии в факеле сточных вод на оси симметрии.

Полученные результаты работы (уравнения 18, 20 и 21) можно использовать для определения размеров конструктивных элементов глубоководных выпусков сточных вод, соответствующих условию $Z_ф <$ H; для изучения процесса распределения концентрации загрязняющего вещества в окрестности выпуска и для определения размеров зоны загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

АХМЕДОВ, Ф.Ш. 1999. Прогнозирование качества воды в окрестностях морских выпусков сточных вод. Материалы семинара: *Экологический мониторинг побережья Большого Баку и Сумгаита,* Баку.

ИБАД-ЗАДЕ, Ю.А., АХМЕДОВ, Ф.Ш. 1994. Моделирование процесса всплывания глубоководного факела. *Труды АзВОДГЕО*, вып. XXI, Баку.

КРИВЧЕНКО, Е.Г. 1979. Определение траектории перемещения факела сточных вод при их глубоководном выпуске. *Труды института ВОДГЕО*, Москва.

Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана Р.М.Мамедов