

С.М. ЭПОЯН, доктор технических наук

Ю.В. ПОЛОЦКАЯ, инженер

Харьковский национальный технический университет строительства и архитектуры

## РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ТЕЧЕНИЯ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

*Рассматривается применение математической модели с параметризацией вертикального обмена импульсом и теплом при помощи осредненных характеристик турбулентности – энергии и масштаба турбулентности к стратифицированному установившемуся течению со знакопеременной скоростью.*

**Ключевые слова:** водохранилища-охладители с объемной схемой циркуляции, стратифицированное течение.

*Розглядається застосування математичної моделі з параметризацією за допомогою осереднених характеристик турбулентності – енергії та масштабу турбулентності до стратифікованої сталої течії зі знакозмінною швидкістю.*

**Ключові слова:** стратифікована течія, водосховища-охолоджувачі.

*We consider the application of a mathematical model with the closure by means of averaged characteristics of turbulence – the energy and scale of turbulence in stratified steady flow with alternating speeds.*

**Key words:** stratified flow, cooling reservoir with a volume of circulation scheme.

Существующие эмпирические и одномерные модели не учитывают влияния границ, внешних воздействий и предыстории течения. Трехмерные позволяют учесть множество особенностей течения и получить значительно больше информации, но весьма сложны с точки зрения математической обработки, численной реализации и требуемой исходной информации. При относительной простоте реализации двухмерные модели позволяют описывать более сложные по сравнению с одномерными гидродинамические процессы и рассматривать более широкий класс прикладных задач.

Представляет интерес описание вертикального тепло- и массообмена с «E-L»-параметризацией. Такой подход является обоснованным теоретически, кроме того модель содержит измеряемые практически величины. Численные расчеты плоских течений стратифицированных

жидкостей с применением различных модификаций, замыкающих соотношений на основе модели Колмогорова–Прандтля [1-4], показали качественно правильное описание вырождения турбулентной энергии и появление устойчивого слоя раздела. Такой подход делает возможным расчет полей гидродинамических параметров а также получение информации о влиянии основных характеристик турбулентности на процесс теплоотдачи.

Цель работы – применение двумерной математической модели охлаждения поверхностного подогретого течения в водоеме-охладителе со стратифицированными противотоками, а также метода расчета основных термогидродинамических параметров течения на основании существующих теоретических и экспериментальных исследований.

Изучался гидротермический режим водохранилища-охладителя с объемной схемой циркуляции при действующей мощности УТЕС 2000-3400 МВт с целью проверки работы теоретических предпосылок на реальном объекте.

В основу расчета термодинамики водоема положены уравнения в гидростатическом приближении:

$$\begin{aligned} \frac{\partial bu}{\partial x} + \frac{\partial bv}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \Delta P}{\partial x} + \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left( bK_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{k}{b} \frac{\partial}{\partial y} \left( bL\sqrt{E} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\zeta}{b} \frac{\tau_{xz}}{\rho_0}; \\ \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} &= \frac{k}{b\alpha} \frac{\partial}{\partial y} \left( bL\sqrt{E} \frac{\partial T}{\partial y} \right); \\ u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} &= kL\sqrt{E} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{g}{b\rho_0} \frac{k}{\alpha} \frac{\partial}{\partial y} \left( bL\sqrt{E} \frac{\partial \Delta p}{\partial y} \right) + \frac{k}{b\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left( bL\sqrt{E} \frac{\partial E}{\partial y} \right) - c \frac{E^{3/2}}{L}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta P = -g \int_0^y \Delta \rho dy$  – избыточное давление над постоянным средним

значением;  $u, v$  – составляющие скорости течения воды в направлениях  $Ox$  и  $Oy$  (ось  $Oy$  направлена вертикально вниз);  $\tau$  – сопротивление трения (касательное напряжение на боковых поверхностях);  $\zeta, \xi$  – функции координат;  $\tau_i = \frac{\lambda}{8} |u|u$  – касательные напряжения, вызванные воздействием

на поток боковых стенок;  $E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{u_i'^2}$  – турбулентная кинетическая энергия;  $k, \alpha, c$  – эмпирические постоянные.

Для масштаба турбулентности  $L$  использовалось уравнение описывающее масштаб турбулентности для двумерных стационарных течений с поперечным сдвигом:

$$L = \frac{1,35E}{\sqrt{0,6E\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left|\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial(E)^{3/2}}{\partial y}\right| + \left|\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} E^{3/2}\right|}}. \quad (2)$$

Данное уравнение для масштаба турбулентности позволяет учесть предысторию течения. Линейность этого выражения экономит компьютерные ресурсы и время счета.

Область, в которой ищется решение, представляет собой прямоугольник в плоскости  $x, y$  (аналогичные водоемы и течения в них рассмотрены в [2,4]), ограниченный снизу  $y = H$  дном водоема, сверху ( $y = 0$ ) – свободной поверхностью.

Для всех уравнений (1,2) задавались такие граничные условия: на дне водоема – прилипание, на свободной поверхности – скольжение, на входящих границах течения задавались распределения параметров.

Основные этапы преобразования уравнений и граничных условий, общая схема сформированного течения были подробно рассмотрены в [2,4].

Численное интегрирование задачи (1) основывалось на методе контрольного объема [5,6]. Для аппроксимации производных применялась схема с разностями против потока, обеспечивающая статическую устойчивость конвективных членов.

Оценка разработанной двумерной математической модели движения стратифицированной жидкости, а также метода реализации производилась путем сопоставления с имеющимися экспериментальными данными в исследуемых зонах. Основные величины, характеризующие кинематическую структуру потока, определялись как прямым способом, так и вычислением по результатам прямых измерений других параметров, в частности – по распределению температуры. На рис.1 представлено графическое сопоставление расчетных и экспериментальных распределений температуры ( $T$ ) в водоеме в сечениях  $x/L = 0,076$  (а);  $0,136$  (б);  $0,23$  (в);  $0,53$  (г) по высоте водоема  $y, m$ .

Сравнение приведенных эпюр показывает, что разработанная модель правильно отражает характер распределения основных параметров течения. Неточное совпадение величин плотности воды у свободной поверхности обусловлено вынужденным приближенным заданием физических параметров воздушной среды над течением, поскольку в источнике информации [9] они отсутствовали. Длина тепловой струи и нижняя граница слоя смешения достаточно точно совпадают с измеренными величинами во всем поле. Погрешности в области у водовыпуска, очевидно, связаны со сложностью процессов, происходящих в ближней зоне.

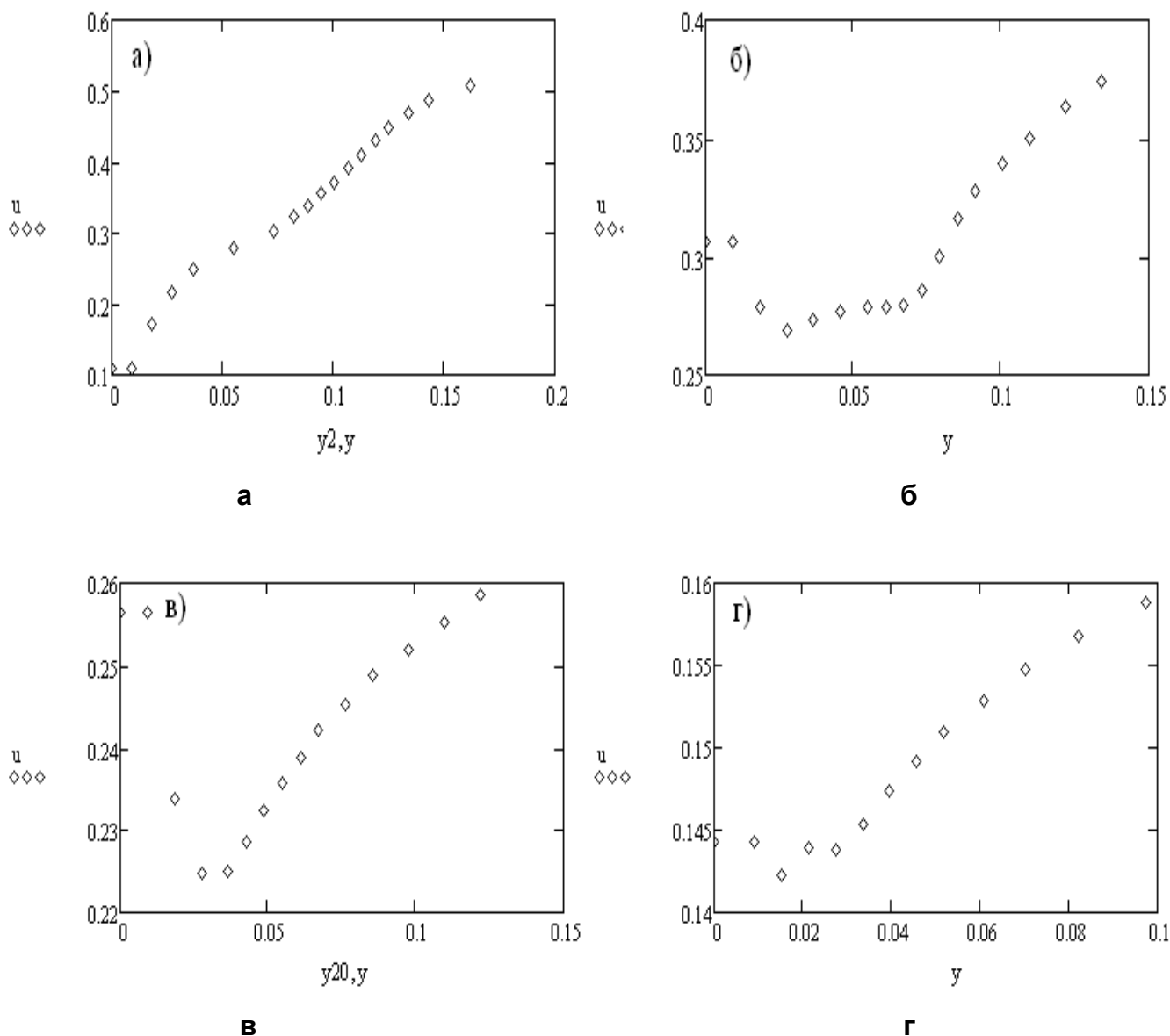


Рис.1. Вертикальное распределение скорости вдоль центральной оси водоема

Отображение поля скорости в естественных координатах (рис. 2) показывает интенсивный массообмен в ближней зоне водовыпуска и растекание струи в дальней зоне.

Профили скорости  $u$  (рис.1) и температуры  $T$  (рис.2) позволяют оценить различие толщины динамического и теплового слоя.

Распределения энергии турбулентности  $\tilde{E}$  (рис.3) показаны в расчетных сечениях. Наибольшие значения  $\tilde{E}$  относятся к горизонтам максимальной скорости и малые величины соответствуют областям с интенсивными процессами массообмена, что соответствует концепции каскадного переноса энергии от крупных до мелкомасштабных энергонесущих вихрей.

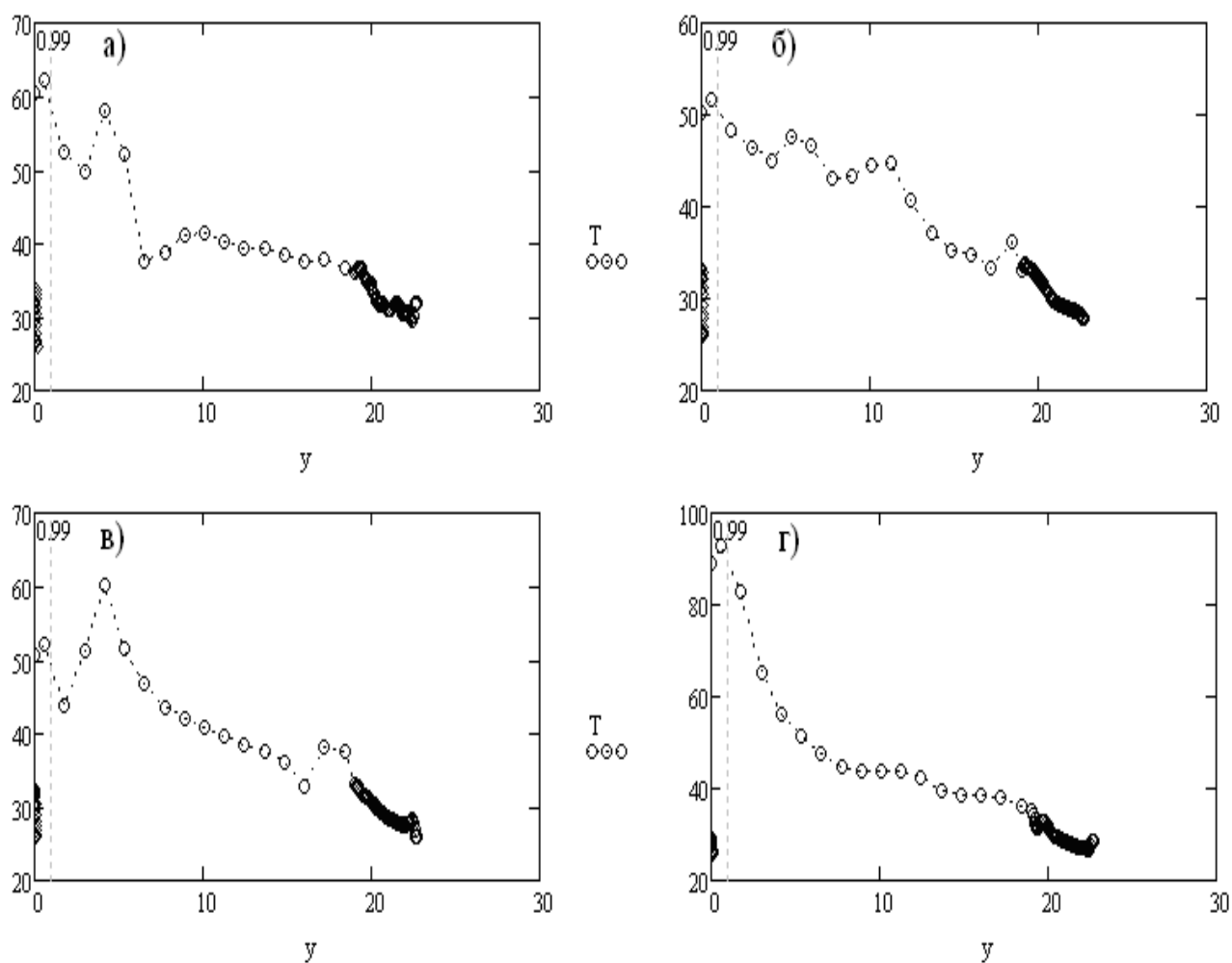


Рис.2. Рассчитанные поля температуры в разных сечениях (а-г) водоема.

Получено хорошее совпадение для рассчитанных величин и экспериментальных данных. Величины, характеризующие кинематическую структуру потока, находятся в соответствии с теоретическими предпосылками модели при относительно простом подходе к моделированию. Значение постоянных модели принималось на основании расчета свободного слоя смешения разноплотностных потоков в двумерном приближении:  $k = 0,0713$ ;  $\alpha = 2,5$ ;  $c = 1,772$ .

С помощью расчетов на ЭВМ система уравнений (1) применялась к расчету термо- и гидродинамических параметров водохранилища-охладителя. Были установлены вертикальные поля скорости и температуры, а также распределения энергии потока  $E$  и масштаба турбулентности  $L$ .

Рассмотренная модель хорошо описывает изменение гидродинамических параметров во всем поле течения кроме области, непосредственно прилегающей к сечению водовыпуска, и может применяться для расчета природных стратифицированных водоемов со знакопеременной продольной скоростью.

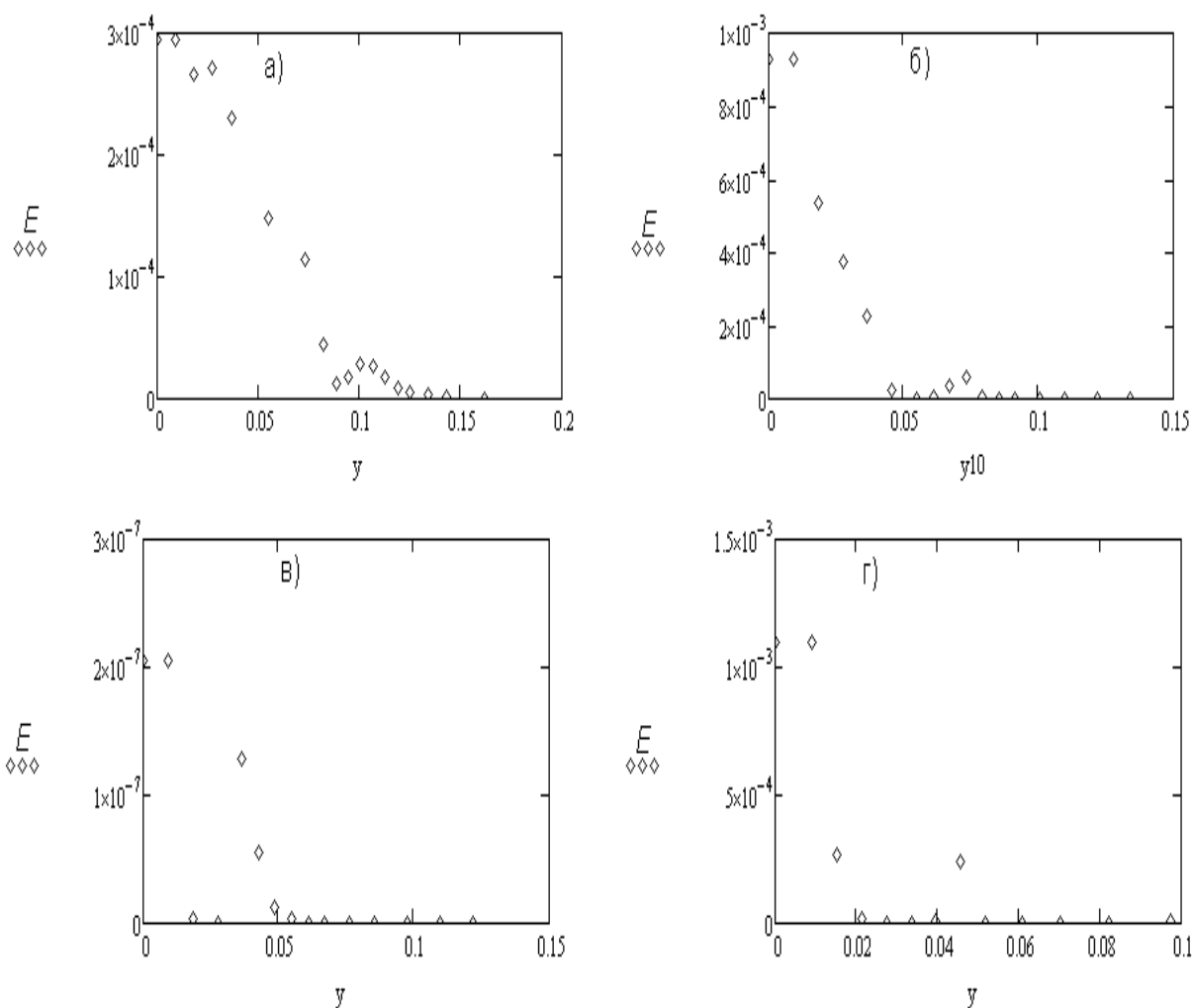


Рис.3. Профили рассчитанной энергии турбулентности в контрольных сечениях (а-г).

### Список литературы

1. Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного течения несжимаемой жидкости. – Изв. АН СССР, сер. физ., Т.6, 1942. – №1–2.
2. Нетюхайло А.П., Полоцкая Ю.В. Построение численного расчета слоя смешения // Науковий вісник будівництва, Харків, ХДТУБА, ХОТВАБУ. – 2008. – вип. 45. – С. 168–178.
3. Полоцка Ю.В. Гидравлика стратифицированного течения в условиях действия поперечного сдвига скорости // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВАБУ. – 2007. – Вип. 42. – С. 147–158.
4. НИР «Натурные гидротермические исследования водохранилища – охладителя Углегорской ГРЭС». Заключение по эффективности объемной схемы циркуляции воды в водохранилище-охладителе при увеличении мощности Углегорской ГРЭС и некоторые обобщающие выводы. /Заключительный/. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Л.: 1978, – № гос. Регистрации 77066389. – 50 с.
5. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 98 с.