

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ КАСКАДА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПЯТНА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Показана ничтожность влияния крупных циркуляционных зон на параметры пятна загрязнения, движущегося по поверхности каскада водных объектов.

Ключевые слова: крупномасштабный сброс, растворимые токсичные вещества, циркуляционные зоны, коэффициенты турбулентного переноса.

V.A. Vazhnik, V.Ju. Vostokov, I.Ju. Oltyan, I.V. Orljanskij

AN ASSESSMENT OF POLLUTION SPOT'S PARAMETERS, MOVING ON THE SURFACE OF CASCADE WATER OBJECTS

The insignificant influence of large circulating zones on the pollution spot's parameters, moving on the surface of cascade water objects.

Key words: large-scale dumping, soluble toxic substances, circulating zones, turbulent transfer coefficients.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 28 апреля 2015 г.

Интенсивное развитие городских и промышленных зон резко увеличивает вероятность возникновения чрезвычайной ситуации, обусловленной крупномасштабным сбросом растворимых токсичных веществ в поверхностные водные объекты. Возможность оценки параметров пятна загрязнения, движущегося по водной поверхности, позволяет смягчить, иногда в значительной степени, последствия таких чрезвычайных событий.

Для прогнозной оценки параметров пятна загрязнения, движущегося по водной поверхности, существует несколько сходных методик – наиболее значимой из них является "Методика прогнозной оценки загрязнения открытых водоисточников аварийно химически опасными веществами в чрезвычайных ситуациях" [1]. Апробация указанной методики выявила ряд недостатков, к числу которых, в первую очередь, следует отнести:

- необходимость привлечения для оценки параметров пятна загрязнения, движущегося по водотоку, большого массива данных;
- трудности методического характера при оценке параметров пятна загрязнения, движущегося по водоему.

В принципе указанные недостатки не являются основанием для отказа от использования методики [1] – она широко и продуктивно используется для оценок при распространении относительно небольшого количества растворимого токсичного вещества в водотоках. Однако при её использовании для прогнозных оценок при чрезвычайных ситуациях, возникающих при крупномасштабных сбросах растворимых токсичных веществ, когда режим водопользования может быть нарушен на несколько тысяч километров вниз по течению, можно столкнуться с непреодолимыми трудностями.

К счастью, чрезвычайные ситуации подобного масштаба крайне редки – у нас в стране за последние полвека к их числу можно отнести только две:

- 26 января 1983 года, через 15 секунд после запуска ракеты-носителя тяжёлого класса с космодрома Плесецк, на лед Северной Двины в районе посёлка Брин-Наволоки Холмогорского района Архангельской области произошло её падение, в результате чего в воду попало около 200 т несимметричного диметилгидразина;

- 13 ноября 2005 года в результате аварии на химическом заводе в городе Цзилинь (КНР) в реку Сунгари (правый приток Амура, являющегося источником питьевой воды Хабаровска) было сброшено около 100 т бензолсодержащих веществ.

Тем не менее, разработка методики, пригодной для оперативной оценки параметров пятна примеси, движущегося по каскадной водной поверхности (водоток – проточный водоем – водоток – ...) является крайне актуальной.

В работе [2] для описания распространения растворимой примеси в водотоке была предложена модель, построенная на предположении, что перемешивание примеси определяется наличием обменных процессов между основным потоком и зонами циркуляции, образующимися в неровностях берегов и дна. Там же для описания перемешивания в районах, примыкающих к крупным циркуляционным зонам (образуемых, как правило, у гидротехнических сооружений, при слиянии водотоков и проч.), было предложено использовать хорошо известную в теории процессов и аппаратов проточную циркуляционную модель.

При определенных предположениях (как представляется, корректных с точки зрения физики) указанные модели дают возможность описать изменение концентрации примеси в пятне (C_1) при его движении по каскадной водной поверхности одной системой уравнений [2]:

$$\begin{aligned} F \frac{\partial C_1}{\partial t} &= - \frac{\partial(WC_1)}{\partial x} - \beta H_3 (C_1 - C_2), \\ H_3 L_3 \frac{\partial C_2}{\partial t} &= \beta H_3 (C_1 - C_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где x – расстояние вниз по потоку от места сброса;

t – время с момента сброса;

F – площадь поперечного основного потока;

C_2 – концентрация примеси в зоне циркуляции;

β – удельный (на единицу площади контакта) обменный поток между зоной циркуляции и основным потоком;

H_3 – удельная (на единицу длины зоны циркуляции) площадь области контакта между зоной циркуляции и основным потоком;

$H_3 L_3$ – площадь поперечного сечения циркуляционной зоны.

Характеристики параметров зон циркуляции (β , H_3 , L_3), образующихся в неровностях берегов и дна, в рамках данной модели известны [2]. В частности:

$$\lambda = \beta / L_3 = \text{const.} \quad (2)$$

Выполнение соотношения (2) дает возможность решить систему уравнений (1) для участков водотоков и/или проточных водоёмов, не примыкающих к крупным циркуляционным зонам.

В работе [2] из соображений размерности были сделаны предложения по учёту влияния крупных циркуляционных зон на параметры пятна примеси. Однако, по большому счету, эти предложения трудно назвать вполне корректными.

Как представляется, корректно оценить влияние крупных зон циркуляции в водотоках на процесс перемешивания примеси можно, используя замеченное Тэйлором ещё в начале XX века совпадение по величине значений коэффициентов турбулентного переноса осреднённой завихрённости, тепла и вещества [3]. В частности, это совпадение приводит к подобию профилей температур и концентраций в потоках со свободной турбулентностью, что подтверждено многочисленными экспериментами различных авторов (некоторые из них представлены в [4]). Что касается профиля осреднённой завихрённости, то из-за методических трудностей он экспериментально не определяется, однако отмеченное равенство значений коэффициентов турбулентного переноса позволяет использовать закономерности гидравлики в нашей задаче.

В рамках гидравлического подхода, для оценки потери давления (энергии) ΔP на участке водотока, на котором присутствуют элементы местного сопротивления (крупные циркуляционные зоны, обусловленные расширением, сужением, поворотом, слиянием и т.д.), применяется общая формула Дарси-Вейсбаха для несжимаемой жидкости:

$$\Delta P = \xi_{\Sigma} \cdot \frac{\rho u^2}{2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости;

u – среднерасходная скорость жидкости;

ξ_{Σ} – суммарный коэффициент сопротивления, равный сумме коэффициента сопротивления трения водотоков по всей длине ($\xi_{\text{тр}}$) и коэффициентов сопротивления элементов местного сопротивления (ξ_i), при условии, что возмущения от одного источника местного сопротивления не накладываются на картину возмущений, создаваемых другим источником:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{\text{тр}} + \sum_i \xi_i. \quad (4)$$

Рассмотрим участок водотока (рис. 1), состоящий из трех прямых участков длиной 100 калибров каждый ($\xi_{\text{тр}} = 300\lambda$, где λ – коэффициент гидравлического трения) и трёх местных сопротивлений, обусловленных наличием крупных циркуляционных зон, образующихся:

при расширении потока – ξ_1 ,

при его сужении – ξ_2 ;

при его повороте – ξ_3 .

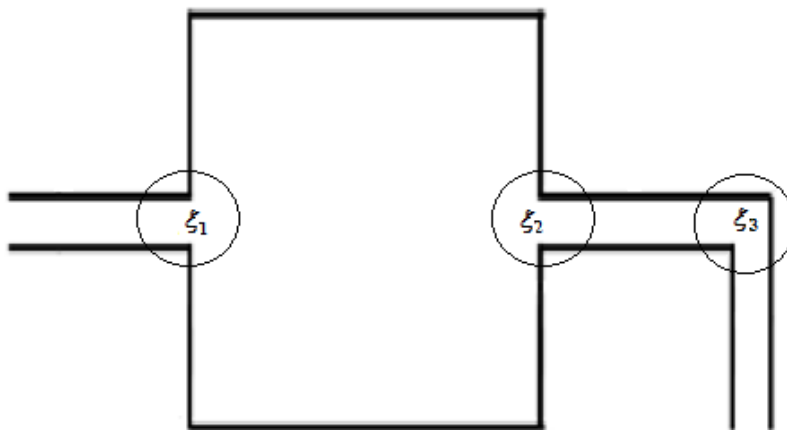


Рис. 1. Модельный участок водотока

Оценим, используя рекомендации [5], вначале суммарный коэффициент сопротивления для варианта водотока с параметрами, которые характерны водопроводным системам (гладкие трубы, прямые углы):

$\xi_{\text{тр}} = 5,88$ (для труб с относительной шероховатостью 0,1 %);

$\xi_1 = 1$ (при ступенчатом расширении в "бесконечность");

$\xi_2 = 0,5$ (при ступенчатом сужении из "бесконечности");

$\xi_3 = 1,19$ (Г-образный поворот без изменения размеров).

Тогда $\xi_{\Sigma} = 8,57$, а доля "вклада" крупных вихрей (местных сопротивлений) составляет чуть менее 46 %.

Для варианта водотока с параметрами, значения которых приближаются к значениям параметров речных систем (шероховатые трубы, сглаженные углы), согласно [5], имеем:

$\xi_{\text{тр}} = 30,6$ (для труб с относительной шероховатостью 10 %);

$\xi_1 = 0,09$ (безотрывный диффузор со степенью расширения 16 и более);

$\xi_2 = 0,05$ (конфузор в диапазоне углов сужений 15°-40° и, практически, любой степени сужения);

$\xi_3 = 0,07$ (скругленный поворот на 90° с 10-кратным превышением радиуса закругления над диаметром канала).

Тогда $\xi_{\Sigma} = 30,81$, а доля "вклада" крупных вихрей (местных сопротивлений) составляет мене 0,7 %.

Представленные оценки показывают, что в ситуации, приближающейся к реальным условиям поверхностных водных объектов, влияние циркуляционных зон, образующихся, например, у гидротехнических сооружений, на энергетику потока и, как следствие, на перемешивание примеси, по сравнению с влиянием мелких вихрей, образуемых в неровностях дна и берегов, ничтожно. То есть для оценки параметров пятна растворимой примеси, движущегося по каскадной водной поверхности, мы можем воспользоваться результатами, полученными в [2] для участков водотоков и/или проточных водоемов, не прилегающих к крупным циркуляционным зонам.

Литература

1. **Методика** прогнозной оценки загрязнения открытых водоисточников аварийно химически опасными веществами в чрезвычайных ситуациях. М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 1996.
2. **Востоков В.Ю.** О модели прогнозной оценки загрязнения открытых водоисточников при чрезвычайных ситуациях // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 6.
3. **Taylor G.I.** The transport of vorticity and heat through fluids in turbulent motion // Proceedings of the Royal Society. Ser. A, #5, 1932. Русский перевод в сборнике "Проблемы турбулентности". ОНТИ. М., 1938.
4. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гостехиздат, 1950.
5. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.