TALLINNA POLÜTEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А № 309

СБОРНИК СТАТЕЙ
ПО

# САНИТАРНОЙ ТЕХНИКЕ

VII

ТАЛЛИН 1971

Ep.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

СБОРНИК СТАТЕЙ
ПО

# САНИТАРНОЙ ТЕХНИКЕ

VII

ТАЛЛИН 1971

Eb. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 628.33

Л.Л. Пааль, О.П.Паулус

# О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ РАБОТЫ МИКРОСЕТОК ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Возможности применения микрофильтров для очистки сточных вод рассматриваются в работах многих авторов, в том числе в работах П.Л. Баучера [4,5], Л.Л. Шляпникова [3], С.И. Быкова [1] и др. Несмотря на проведенные исследования, до сих пор не разработана теоретически обоснованная модель микрофильтра, анализ которой позволил бы определить рабочий режим микрофильтров при различных условиях работы и различных концентрациях взвешенных веществ в исходной воде. Для развития исследований процесса микрофильтрации следует, по нашему мнению, разработать новую, опытами обоснованную модель микрофильтра. Надобность в новой теории микрофильтров связана с тем, что существующие методы (Баучер и др.) не могут быть использованы при наличии больших концентраций взвешенных веществ в исходной воде.

Анализ приведенных в литературе закономерностей микрофильтрации приводит к выводу, что коэффициент сопротивления изменяется в процессе микрофильтрации, и поэтому коэффициент сопротивления микросетки является основным показателем работы микрофильтра.

Многие авторы отделяют сопротивление чистой микросетки от сопротивления образовавшейся пленки на микросетке и рассматривают их как отдельные величины. По нижеприведенной методике нами рассматривается суммарное сопротивление микросетки (чистая сетка + пленка). Такой подход обоснован тем, что при работе микросетки коэффициент сопротивления не является постоянной величиной, а зависит от времени работы, т.е. $\xi = f(t)$ в пределах

$$\xi = \xi_0 \quad \text{и} \quad \xi \to \infty, \tag{I}$$

где $\xi_0$ – коэффициент сопротивления во время образования оптимальной пленки.

Анализ работы микросеток показывает, что изменение коэффициента сопротивления во времени в процессе очистки пропорционально скорости образования пленки на микросетке. Значит, работу микрофильтра можно выразить следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\xi}{dt} - K\xi = 0, \tag{2}$$

где $\xi$ – суммарный коэффициент сопротивления;

$K$ – скоростной коэффициент образования пленки на микросетке.

Уравнение (2), как уже отмечалось, выражает изменения коэффициента сопротивления, если оптимальная пленка на микросетке уже образована. В начале процесса, когда на чистую микросетку начинают оседать частицы взвешенных веществ, коэффициент сопротивления является приблизительно постоянной величиной и уравнение (2) недействительно. Следовательно, начальные условия при решении уравнения (2) могут быть следующие:

при $$t = T, \quad \xi = \xi_0 \tag{3}$$

где $T$ – время образования оптимальной пленки на микросетке;

$t$ – продолжительность фильтроцикла.

Исходя из условий (3) решение уравнения (2) выражается в виде

$$\xi = \xi_0 e^{K(t-T)}. \tag{4}$$

В практических расчетах формула (4) неудобна, так как дополнительно надо определять величины $\xi_0$ и $T$. Для упрощения расчета вводим фиктивное сопротивление $\xi_c$, которое соответствует моменту времени $t = 0$. В таком случае получим решение уравнения (2) в следующем виде:

$$\xi = \xi_c e^{Kt}. \tag{5}$$

Для определения скоростного коэффициента образования

пленки на микросетке, а также для контроля правильности уравнения (2), были проведены в лаборатории соответствующие эксперименты. Для этого в мембранный фильтр вставляли микросетку и из распределительного сосуда подавалась сточная вода ( $S = const$ ) на мембранный фильтр. Под мембранным фильтром стояла калиброванная мензура, при помощи которой измерялся расход сточной воды через микросетку.

Концентрации взвешенных веществ в сточной жидкости были выбраны с таким расчетом, чтобы они захватили весь действительный диапазон колебания взвешенных веществ сточной жидкости в хозяйственно-бытовом коллекторе. Эксперименты проводились с четырьмя концентрациями взвешенных веществ, а именно: 82, 162, 350 и 650 мг/л. Были использованы микросетки с размерами ячеек в 100, 80, 63 и 40 мкм. Во время экспериментов держался постоянный напор сточной жидкости на микросетке - 5 см (т.е. высота цилиндра мембранного фильтра). С самого начала процесса фильтрации, через каждые 5 сек, фиксировался уровень воды в калиброванной мензуре. Для этой цели применялась кинокамера "Пентафлекс".

В результате экспериментов получены зависимости объема протекающей через микросетку сточной жидкости $W$ от времени $t$ , т.е. кривые $W = f(t)$ для каждой микросетки и концентрации взвешенных веществ отдельно.

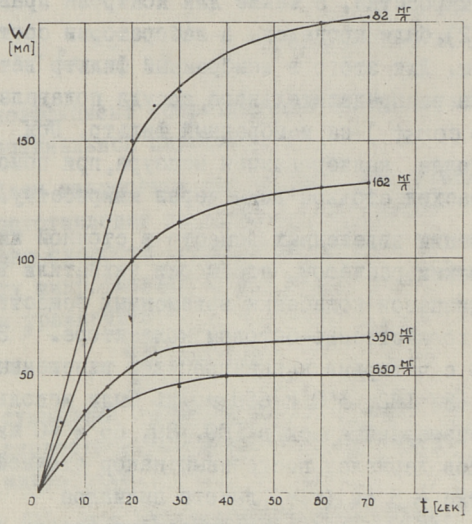
Результаты, полученные в виде функции $W = f(t)$, позволяют легко определить скорость фильтрации через микросетку по следующей формуле:

$$\frac{\Delta\left(\frac{W}{F}\right)}{\Delta t} = v, \qquad (6)$$

где $F$ - площадь сечения микросетки в мембранном фильтре.

Итак, касательная функции $W = f(t)$ в данной точке дает зависимость скорости фильтрации от времени, т.е. функцию в виде $v = f(t)$.

Результаты обработки зависимости $W = f(t)$ показали, что скорость фильтрации в начале процесса не изменяется и является постоянной величиной. Постепенное уменьшение скорости фильтрации замечается лишь через определенное время. Физическая сущность данного влияния заключается в том, что время, в течение которого скорость фильтрации постоянная, можно считать периодом образования пленки на микросетке. В про-




Фиг. 1. $w = f(t)$, микросетка 004

цессе дальнейшего фильтрования толщина пленки на микросетке увеличивается, вследствие чего скорость фильтрации уменьшается, а суммарное сопротивление увеличивается.

Для определения суммарного коэффициента сопротивления при обработке лабораторных данных применялась известная из гидравлики формула

$$v = \varphi\sqrt{2g\Delta H}, \qquad (7)$$

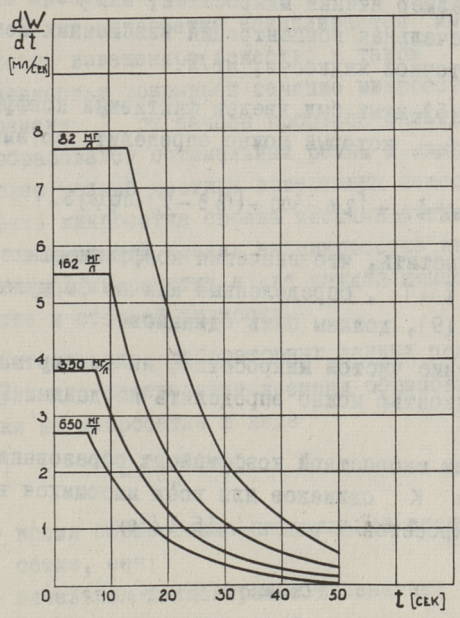
где $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\xi}}$ – коэффициент скорости.

Из формулы (7) имеем, что

$$\xi = \frac{2g\Delta H}{v^2}. \qquad (8)$$

Итак, зная для определенной марки микросетки и определенной концентрации взвешенных веществ сточной жидкости зависимость $v = f(t)$, возможно, используя формулу (8), вычислить новую зависимость $\xi = f(t)$.

Как показала обработка лабораторных данных, все результаты исследования дали аналогичную закономерность измене-




Фиг. 2. Изменение скорости фильтрации, микросетка 004

ния коэффициента сопротивления, хотя величины расчетных коэффициентов были разные. Тем самым доказана правильность уравнения (2), которое нами предлагалось для характеристики работы микрофильтров. Полученные результаты приведены в виде графиков $\ln\xi = f(t)$.

Из фиг. 3 выясняется, что во время $T$ коэффициент сопротивления является постоянной величиной и только по истечении времени $T$ увеличивается по экспонентной функции. Следовательно, время $T$ можно назвать временем образования оптимальной пленки на микросетке.

Постоянный коэффициент сопротивления $\xi_0$ в период образования оптимальной пленки определяется по эмпирической формуле, полученной при обработке данных лабораторных экспериментов, и имеет вид

$$\xi_0 = \xi_{чс} + \left(11{,}4 - \frac{\phi}{14{,}4}\right) S_н , \qquad (9)$$

где $\xi_{чс}$ – сопротивление чистой микросетки;

$\phi$ – размер ячейки микросетки, мкм;

$S_н$ – начальная концентрация взвешенных веществ в сточной жидкости, мг/л.

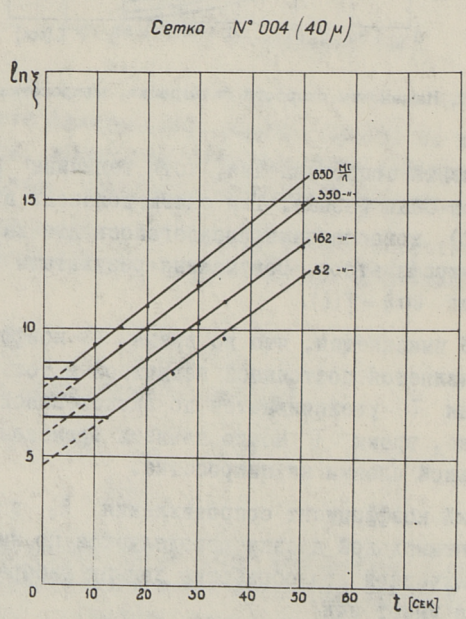
В формулу (5) нами был введен фиктивный коэффициент сопротивления $\xi_c$, который можно определить по эмпирической формуле:

$$\xi_c = \xi_{чс} + \left[2\phi - 300 + (18{,}8 - 9{,}1 \log \phi) S_н\right]. \qquad (10)$$

Следует отметить, что значения коэффициента сопротивления в точке $t = T$, определенные как по формуле (5), так и по формуле (9), должны быть одинаковы.

Сопротивление чистой микросетки, по нашему мнению, с достаточной точностью можно определить по данным Ю.М.Кузьмина [2].

По расчетам скоростной коэффициент образования пленки на микросетке K одинаков для всех имеющихся в нашем распоряжении микросеток и равен 0,15 1/сек.




**Фиг. 3. Изменение суммарного коэффициента сопротивления во времени, микросетка 004**

Физический процесс образования пленки заключается в том, что во время T на микросетке накапливается имеющееся в сточной жидкости взвешенное вещество в таком количестве, что пленка полностью покрывает сечение микросетки. Значит, в течение времени T от начала процесса фильтрации на микросетке образовался оптимальный режим и микросетка задерживает более мелкие частицы взвешенных веществ, чем может задерживать микросетка своими чистыми ячейками. Время образования оптимальной пленки на микросетке является различным для каждой микросетки и для каждой концентрации взвешенных веществ в сточной жидкости.

В результате анализа лабораторных данных получена обобщенная формула для определения времени образования оптимальной пленки на микросетке в виде

$$T = B S_н^{-0,31}, \qquad (II)$$

где T - время образования оптимальной пленки на микросетке, сек;

$S_н$ - начальная концентрация взвешенных веществ в сточной жидкости, мг/л;

B - численный коэффициент, величина которого зависит от марки микросетки.

Численные величины коэффициента B приведены в таблице I.

Таблица I

| Марка микросетки | 01 | 008 | 0063 | 004 |
|---|---|---|---|---|
| B | 83,0 | 66,0 | 57,2 | 49,5 |

Обработка лабораторных экспериментов показала, что показатель степени -0,31 в формуле (II) является постоянным для всех применяемых нами микросеток.

Вышеприведенная закономерность фильтрации сточных вод через микросетки является исходным для проектирования микрофильтров. При этом следует отметить, что при механической очистке производственных сточных вод предлагаемые нами численные коэффициенты могут быть разными, и вопрос требует дополнительного исследования при каждом конкретном случае.

## Литература


I. Быков С.И. Доочистка сточных вод на микроситах. Городское хозяйство Москвы, № 10, 1966.

2. Кузмин Ю.М. Напорные сетчатые фильтры систем водоснабжения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, ВВИТКУ, Ленинград, 1969.

3. Шляпников Л.Л. Применение микрофильтров для очистки сточных вод. Водоотведение и очистка вод, Минск, 1969.

4. Boucher, P.L. Micro-straining as a water and sewage purification process. Municipal Utilities Magazine, vol.94, VIII, No.8, 1956.

5. Boucher, P.L. Micro-straining. Journal of the Institution of Public Health Engineers vol.60, part 4, 1961.



L.Paal, O.Paulus


On the theoretical conception of the operation of microstrainer in sewage treatment


Summary

This paper deals with the theoretical conceptions of the operation of microstrainers worked out on the basis of experimental data. Generalized formulas are also given for determining the parameters influencing the operation of microstrainers used for primary purification of sewage.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 551.482.214

А.М. Айтсам, Э.Б. Кауп

# ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОСТАВЛЯЮЩИХ КИСЛОРОДНОГО БАЛАНСА РЕКИ НА ОСНОВЕ СУТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАСТВОРЕННОГО $O_2$

Кислородный баланс реки можно разделить на следующие составляющие:

1) потребление кислорода на биохимическое окисление растворенных и взвешенных органических веществ;

2) потребление кислорода бентосом (донные отложения и донная фауна);

3) атмосферная реаэрация;

4) фотосинтетическая деятельность макрофитов и фитопланктона: потребление кислорода в течение всех суток и продуцирование кислорода в светлое время суток.

Зная пространственно-временные значения этих составляющих, можно прогнозировать концентрацию кислорода на рассматриваемом участке реки, что является одной из важнейших задач при прогнозировании качества воды в водотоках.

Первые три составляющих зависят в данных условиях от температуры и концентрации $O_2$. В течение суток их можно с достаточной достоверностью считать постоянными; существуют методы для их определения в инженерных расчетах.

Фотосинтетическая деятельность зависит в данных условиях, кроме температуруры, прежде всего от интенсивности фотосинтетически активной радиации. Так как радиационные условия могут быть весьма изменчивые, то и эта составляющая является очень изменчивой величиной, и ввод ее в инженерные расчеты является сложной задачей, которую пока решить не удалось.

Есть данные, которые показывают, что содержание $O_2$ в речной воде зависит больше от эффекта фотосинтеза, чем от атмосферной реаэрации [2]. Возможность и целесообразность учета фотосинтеза при инженерных расчетах процессов самоочищения воды требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований [I].

нам представляется, что хотя суточный эффект фотосинтеза в ряде случаев может быть почти нулевым, необходимо все-таки с точки зрения утреннего минимума $O_2$ в реке, который обуславливается дыханием растительности, учитывать потребление и продуцирование $O_2$ растительностью.

Ниже сделана попытка на основе суточного цикла измерения растворенного $O_2$ в реке рассчитать фотосинтетическую и атмосферную реаэрацию кислородом, т.е. из общего изменения содержания кислорода в воде отделить изменения, происходящие благодаря фотосинтетической и атмосферной реаэрации.

Цикл измерений был произведен на небольшой реке с I по 2 июля 1970 года.

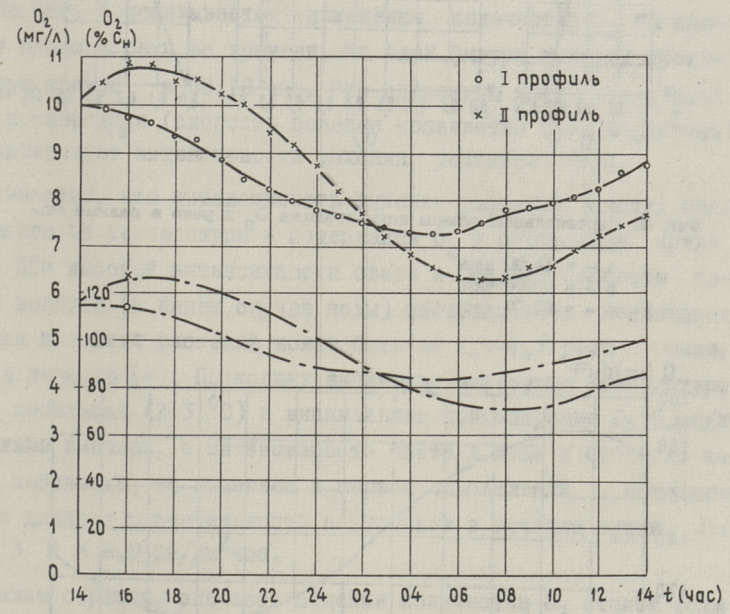
Основной измерительный профиль находился в 2,5 км ниже поступления загрязнения. Как и на предыдущем участке, средняя глубина здесь была I,7 м, средняя ширина - IO м. Этот участок густо зарос высшими водными растениями, в основном полностью погруженными Potamogeton, а также частично погруженными Phragmites communis и Nuphar Luteum. В первом приближении можно считать распределение растительности однородным в каждом поперечном сечении на всем рассматриваемом участке длиной 2,5 км. Этому участку предшествовал участок длиной не менее 2,0 км с бедной водной растительностью.

Перед основным участком находился первый наблюдательный пост, где производилось суточное измерение растворенного $O_2$ на оси потока в глубине 0,2 м (общая глубина была примерно 0,7 м). В основном профиле производилось измерение в поверхностном и придонном слоях воды (глубина I,7 м). Для измерения были использованы электрохимические датчики растворенного $O_2$ УТ-6803, изготовленные Тартуским

государственным университетом. Датчик обеспечивает точность измерения 0,I мг/л.

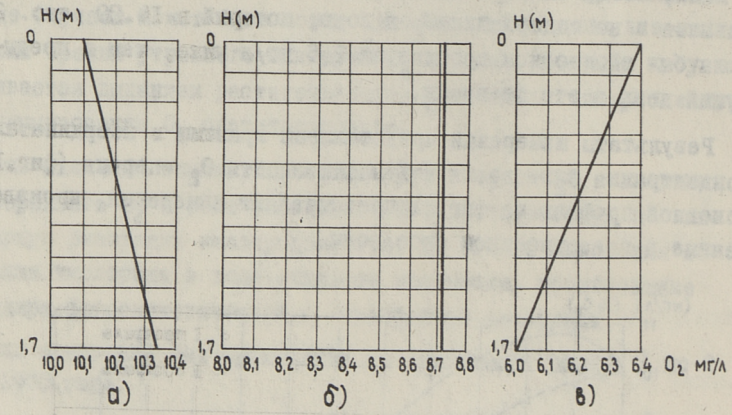
В обоих профилях измерения производились через каждый час начиная с I июля I4.00 час. до 2 июля I4.00 час. В этот период солнечная радиация, в общем, была на уровне возможной радиации, за исключением периода с 06.00 до I2.00 час. 2 июля, когда была облачность 8-9 баллов. Этот период отразился и на содержании $O_2$ в воде, который в I4.00 час. 2 июля был в основном профиле на 2,5 мг/л ниже, чем в предыдущий день в это же время.

Результаты измерений представлены кривыми в координатах: концентрация $O_2$ - время и % насыщенности $O_2$ - время (фиг.I). Основной профиль на фиг. I представляют измерения, произведенные в поверхностном слое воды.

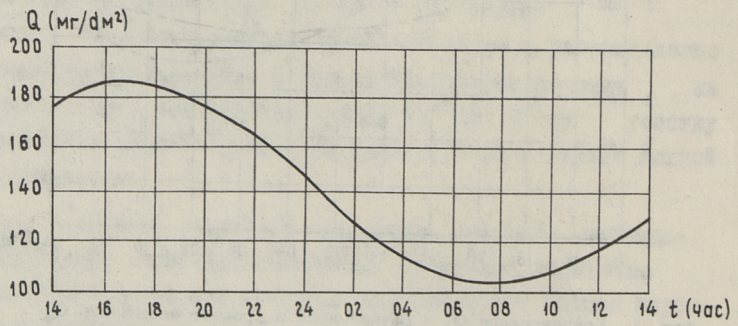



Фиг. 1. Концентрация $O_2$ в речной воде и процент насыщения $O_2$ во времени:
I профиль - предшествует участок с бедной водной растительностью.
II профиль - предшествует участок с обильной водной растительностью.

На кривой основного профиля особый интерес представляет момент времени, соответствующий пересечению линии 100 процентов кривою процента насыщения. На фигуре видно, что этот момент был в 00,10 час. Можно считать, что в момент, когда весь столб воды находится в состоянии насыщенности, не происходит никакой направленной вертикальной диффузии $O_2$ в столбе воды и на поверхности раздела вода-воздух.




Фиг. 2. Вертикальные эпюры концентрации $O_2$ в реке в разные моменты:
а – в 14.00 час.
б – в 00.00 час.
в – в 06.00 час.




Фиг. 3. Общее изменение содержания растворенного $O_2$ во времени

Если это насыщение достигается в ночное время суток, то причиной является потребление кислорода водой и бентосом, а также дыхание растений. В условиях данного участка реки при отсутствии заметных донных отложений и при почти фоновой загрязненности - $БПК_5 \approx 3$ мг/л) учитываем в первом приближении только дыхание растений.

Так как ввиду фотосинтетической реаэрации концентрация $O_2$ и его суточный ход в поверхностном слое в общем отличаются от тех же величин в придонном слое, то надо учитывать изменение содержания $O_2$ во всем столбе воды. Для этого через каждый час были вычерчены вертикальные эпюры содержания $O_2$.

На фиг. 2 представлены некоторые характерные из этих эпюр.

На фиг. 3 показывается изменение количества $O_2$ на единицу площади реки во времени. По этой фигуре находим производную кривой в 00.10 час. При сделанных выше допущениях эта производная (скорость падения количества $O_2$ в мг/дм$^2$час) характеризует интенсивность дыхания растительности.

Известно, что интенсивность дыхания растений зависит больше всего от температуры и содержания $O_2$ в окружающей среде [3]. При высокой интенсивности света и большой скорости потока воздуха (в нашем случае воды) интенсивность поглощения $O_2$ для наземных растений может быть до 1,4-1,7 раза выше, чем в темноте [4]. Поскольку амплитуда изменения температуры была небольшая (2-3 $^{o}$C) и минимальная концентрация $O_2$(6,3мг/л) довольно высокая, а интенсивность света в воде и скорость потока небольшие, то полагаем в первом приближении интенсивность дыхания растительности постоянной в течение суток. По фиг. 3 R = 8,0 мг/дм$^2$час.

Таким образом, скорость падения количества $O_2$ столба воды в условиях насыщения

$$\Delta Q^* = R. \qquad (I)$$

Далее рассмотрим существование дефицита $O_2$ в столбе воды. Дефицит считаем положительным, если концентрация $O_2$ выше насыщения, и отрицательным – в противном случае.

Известно, что при наличии дефицита $O_2$ между атмосферой и водой возникает обмен $O_2$, который может быть представлен уравнением

$$P = -K_2 \Delta t D, \qquad (2)$$

где $P$ – изменение содержания $O_2$ за отрезок времени $\Delta t$, в середине которого наблюдается дефицит $D$;

$K_2$ – коэффициент атмосферной реаэрации.

Назовем $P$ атмосферной реаэрацией, которая будет положительной, если $O_2$ проникает из воздуха в воду, и отрицательной – в противном случае.

Пусть существует в столбе воды в ночное время дефицит $O_2$. Уменьшить или увеличить этот дефицит могут два фактора: дыхание $R$ и реаэрация $P$. Таким образом,

$$\Delta Q = P - R. \qquad (3)$$

В этой формуле $R$ определяется в момент насыщения, $\Delta Q$ можно найти исходя из результатов измерений (фиг. 3 и 4). Из формулы (3) можно найти $P$ и из формулы (2) – $K_2$

$$K_2 = \frac{P}{-D\Delta t}. \qquad (4)$$

Солнце зашло во время настоящего цикла в 22.40 час. и взошло в 04.10 час. по декретному времени. При расчете $K_2$ в основном использован этот ночной период. Величины $\Delta Q$ найдены как средние в отношении измерений, произведенных в каждый полный час. Дефицит кислорода $D$(мг/дм$^2$) определяется по среднему содержанию $O_2$ в поверхностных и придонных слоях (учитывают направленную диффузию $O_2$ в столбе воды). В таблице I приведены коэффициенты атмосферной реаэрации $K_2$ в единицах 1/час.

Как видно из таблицы, значения $K_2$ получены разные, причем величина $K_2$ возрастает по мере удаления от момента насыщения. Поэтому ясно, что значения $K_2$, полученные на основе измерений, сделанных в 21.00 и 05.00 час. не следует вводить в общий счет (по-видимому, имеется уже достаточно света для фотосинтеза).

Таблица I

Определение коэффициента атмосферной реаэрации $K_2$

| t, час | $\Delta Q$, мг/дм$^2$ | P, мг/дм$^2$ час | $O_2$, мг/л | D, мг/дм$^2$ | $K_2$, I/час |
|---|---|---|---|---|---|
| 2I.00 | -5,75 | -2,25 | 9,9 | 22,8 | 0,099 |
| 22.00 | -7,0 | -I,0 | 9,5 | I6,0 | 0,063 |
| 23.00 | -7,5 | -0,5 | 9,I | I0,9 | 0,046 |
| 24.00 | -8,0 | 0 | 8,7 | 0 | - |
| 0I.00 | -8,0 | 0 | 8,I | - | - |
| 02.00 | -7,5 | 0,5 | 7,6 | -I8,7 | 0,027 |
| 03.00 | -7,0 | I,0 | 7,I | -25,2 | 0,040 |
| 04.00 | -6,0 | 2,0 | 6,8 | -34,8 | 0,057 |
| 05.00 | -4,75 | 3,25 | 6,4 | -38,6 | 0,084 |

В первом приближении принимаем за расчетный коэффициент $K_2$ среднее его значение, полученное на основе измерений в 22.00, 23.00, 03.00 и 04.00. Получаем $K_2$ = 0,05I I/час. На основе десятичных логарифмов и в I/сутки получаем $K_2$ = 0,53 I/сутки.

Если вычислять $K_2$ при помощи гидравлических параметров, используя широко известную в литературе формулу Черчиля

$$K_2 = \frac{2.32 v}{H^{3/3}},$$

где $v$ - скорость потока (м/сек);

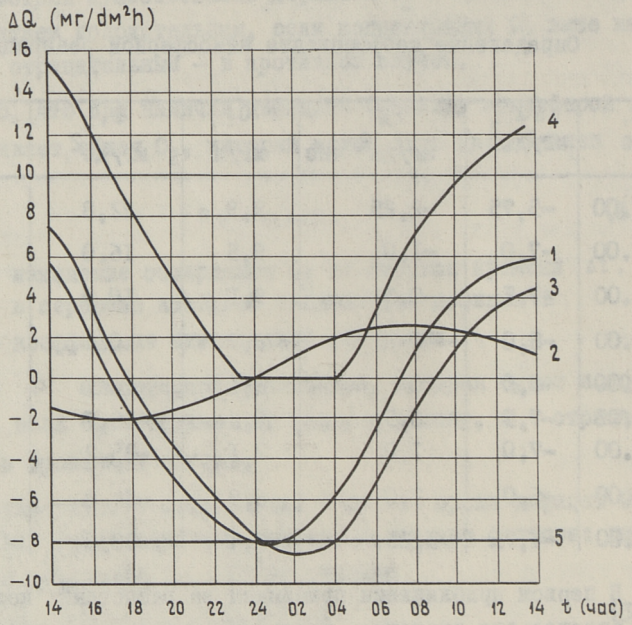
$H$ - глубина потока (м),

получим $K_2$ = 0,36 I/час.

Если учесть, что формула Черчиля получена при статистической обработке широкого диапазона гидравлических условий, то можно совпадение считать хорошим и полученную величину $K_2$ достаточно надежной.

Зная дефицит $O_2$ за каждый час, можно вычислить значения атмосферной реаэрации P в течение суток (кривая 2, фиг.4).

Вычитая графически от кривой I кривую 2, получаем изменение $O_2$, которое происходит благодаря фотосинтезу и дыханию (кривая 3).




Фиг. 4. Составляющие баланса $O_2$ реки.

1 – интенсивность общего изменения $O_2$;
2 – интенсивность атмосферной реаэрации;
3 – интенсивность фотосинтеза и дыхания (вместе взятые);
4 – интенсивность фотосинтеза;
5 – интенсивность дыхания.

Вычитая от кривой 3 постоянную интенсивность дыхания R = = 8,0 мг/дм$^2$ час (прямая 5), получим суточную кривую фотосинтеза (кривая 4).

Интегрируя графически эти кривые, получим следующие приближенные значения составляющих кислородного баланса в данных условиях за сутки (таблица 2).

Таблица 2

Составляющие кислородного баланса реки в мг/дм$^2$ сутки

| | ΔQ, | P, | F+R, | F, | R, |
|---|---|---|---|---|---|
| Прибывает | 33,0 | 25,0 | 27,5 | I48,0 | – |
| Убывает | 76,0 | I5,0 | 82,0 | – | I92,0 |

## Выводы

I. При наличии небольших скоростей потока и обильной водной растительности между поверхностным и придонным слоем воды существует заметный градиент концентрации $O_2$ (фиг. 2).

2. Коэффициент атмосферной реаэрации $K_2$ можно с удовлетворительной точностью определять по измерениям $O_2$, проведенным в небольшом диапазоне времени (3-4 часа, включающие насыщение воды $O_2$ в ночное время).

3. Максимальные значения фотосинтетической реаэрации в данных, довольно типичных условиях намного превышают максимальные значения атмосферной реаэрации (соответственно I5,5 и 2,5 мг/дм$^2$ час).

4. При наличии значительной облачности общий суточный эффект растительности по отношению к содержанию $O_2$ может быть отрицательным (см. табл. 2).

## Литература

I. Х.А. Вельнер, А.М. Айтсам, Л.Л.Паальъ. Об основах инженерного расчета самоочищающей способности водотоков. Доклады симпозиума по самоочищению. Таллин,I965.

2. T.Camp. Field estimates of oxygen balance parameters. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.91., No.SA5,Proc.Paper 4485, October 1965, 1-16.

3. R.W. Edwards, M. Owens. The effects of plants on river conditions. IV. The oxygen balance of a chalk stream, J.Ecol.,Vol.50.,No. 1,1962, 207-220.

4. Hew Choy-Sin, G. Krotkov, D.T. Canvin. Determination of the rate of $CO_2$ evolution in light and darkness. "Plant Physiol.", 1969, 44, No. 5, 662-670.

A. Aitsam, E. Kaup

# On determination of river oxygen balance parameters

Summary

An attempt to determine atmospheric and photosynthetic reaeration as well as the respiration of river vegetation is made on the basis of diurnal cycle of measurements of dissolved oxygen carried out in a North Estonian river. There were no bottom deposits or water pollution in the case examined. Considering the intensity of plant respiration to be constant during the day the coefficient of atmoshperic reaeration is calculated. It is pointed out that the maximum instantaneous values of photosynthetic reaeration are 6-7 times higher than these of the atmospheric. As a result of photosynthetic and respiration activity of vegetation the vertical gradient of dissolved oxygen turned out to be up to 0.3 mg/l m.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 532.135

Ю.Я. Сяэрекыннo, Л.А. Тепакс

# ПОТЕРИ НАПОРА ПРИ ВНЕЗАПНОМ РАСШИРЕНИИ СТРУКТУРНОГО ПОТОКА БИНГАМОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

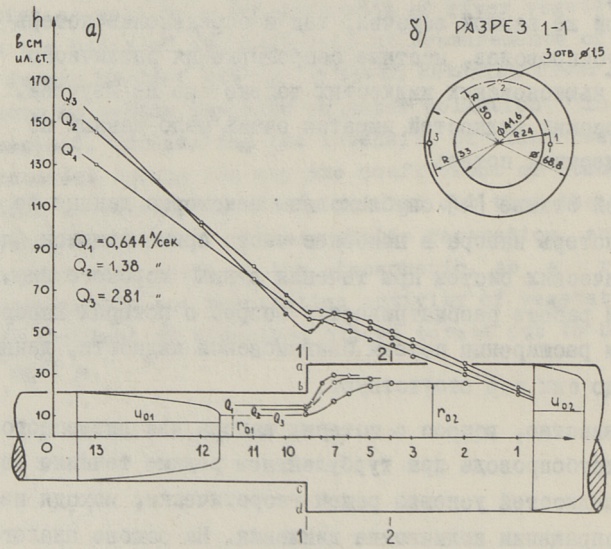
Хотя расчет потерь напора в местных сопротивлениях является такой же важной задачей, как и определение потерь по длине трубопроводов, местные сопротивления различного типа даже при ньютоновских жидкостях далеко еще не изучены. Для неньютоновских жидкостей имеется очень мало данных по определению местных потерь.

В нашей статье [4] опубликованы некоторые данные по определению потерь напора в наиболее часто применяющихся частях технологических систем при течении в них морского ила. В настоящей работе рассматривается вопрос о потерях напора при внезапном расширении потока бингамовской жидкости, данные о которых до сих пор отсутствуют.

Как известно, вопрос о потерях напора для внезапного расширения трубопровода при турбулентном режиме течения ньютоновских жидкостей успешно решен теоретически, исходя из закона о приращении количества движения. На основе аналогичных рассуждений С.А. Егоров [1] вывел формулу для потерь напора на внезапное расширение при ламинарном режиме, а В.Н. Карев [2] предложил общую формулу как для ламинарного, так и для турбулентного режима ньютоновской жидкости. По известным нам литературным данным вышеуказанный вопрос для бингамовской жидкости пока не изучался.

Нами была проведена экспериментальная работа на внезапных расширениях труб круглого сечения $d = 41{,}6/68{,}8$ мм ($K = 0{,}605$) и $d = 41{,}6/92{,}0$ мм ($K = 0{,}452$). Опыты проводи-

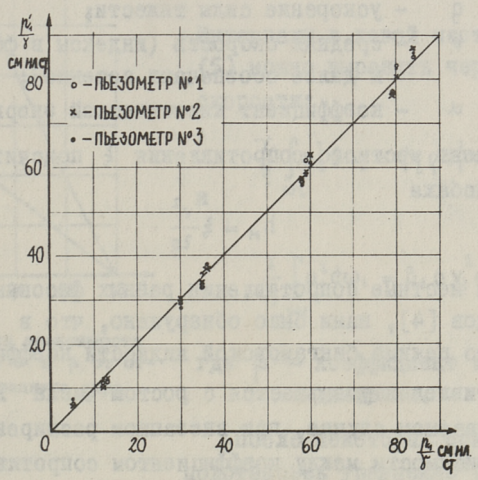
лись с морским илом при четырех влажностях в пределах $W$ = = 78,5...85,3 %. В этих условиях реологические параметры $\eta$ и $\tau_0$ изменялись в пределах $\eta$ = 0,213...0,817 пз и $\tau_0$ = = 81...528 дн/см$^2$. Расход ила изменялся в пределах $Q$ = 0,63 ... 3,1 л/сек, а диапазон изменения обобщенного числа Рейнольдса $Re^{**} = \rho v d \left(1 - \frac{4}{3} a_1 + \frac{1}{3} a_1^4\right)/\eta$ был в пределах $Re^{**}$ = 24... 1997. Этот критерий предложен в работе [3] и основан на использовании полной формулы Бакингэма. Измерение давления по длине трубопровода производилось в 13 точках (см.фиг. 1, где горизонтальный масштаб в 20 раз больше вертикального). Одновременно замеряли распределение скоростей. Методика измерений приведена в [5].




**Фиг. 1. Структура потока морского ила при внезапном расширении трубопровода**

По В.Н. Кареву [2] в ламинарном потоке ньютоновской жидкости удельное давление $p_1'$ на стенках расширения ab и cd отличается от давления $p_1$ в сечении bc (фиг. 1), причем разница давлений $(p_1 - p_1')$ зависит от числа Рейнольдса, в результате чего коэффициент местного сопротивления также зависит от числа Рейнольдса.

Чтобы проверить вышесказанное в условиях движения бингамовской дисперсной системы (морской ил), на стенке расширения (K = 0,605) были просверлены три импульсных отверстия (см. фиг. I б) для измерения давления $p_1'$. Давление $p_1$ в сечении bc определялось экстраполяцией пьезометрических линий узкой части трубопровода в сечение I-I. Сравнение полученных давлений $p_1$ и давлений $p_1'$ приводится на фиг.2, из которой видно, что давления $p_1$ и $p_1'$ практически равны, и в сечении I-I, а также на стенке действует гидростатический закон распределения давления.




**Фиг. 2. График зависимости $\frac{p_1'}{\gamma}=f\left(\frac{p_1}{\gamma}\right)$ для внезапного расширения при K = 0,605**

При снятии скоростных эпюр четко обнаружилось существование ядра потока. Установлено, что ядро сохраняется и в переходной зоне между сечениями I-I и 2-2 (фиг. I), причем в этой области ядро плавно расширяется. Интересно отметить, что длина переходной зоны тем больше, чем меньше относительный радиус ядра $a_1$ в узкой части трубы. На некотором расстоянии позади расширения эпюра скоростей принимает характерную для бингамовской жидкости форму. Приближаясь к стенкам трубы, скорость резко уменьшается, вследствие чего измерения скоростей становятся неточными. Использованная нами опытная методика не позволила обнаружить наличие застойных зон.

Полученные экспериментальные данные подвергались обработке, в ходе которой подсчитывались скоростные напоры и определялись линии энергии по длине трубопровода. Согласно общепринятой методике исследования местных сопротивлений прямые участки линий энергии экстраполировались в сечении I–I и потеря удельной энергии $h_м$ определялась как

$$h_м = \left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}\right), \qquad (I)$$

где $\gamma$ – удельный вес;

$g$ – ускорение силы тяжести;

$v$ – средняя скорость (индексы в формуле (I) и далее обозначают сечение);

$\alpha$ – коэффициент кинетической энергии.

Коэффициент местного сопротивления $\xi$ подсчитывается по формуле Вейсбаха

$$h_м = \xi \frac{v_1^2}{2g}. \qquad (2)$$

Исследуя местные сопротивления разных фасонных частей трубопроводов [4], нами было обнаружено, что в условиях структурного режима бингамовской жидкости коэффициент местного сопротивления уменьшается с ростом числа Рейнольдса. В рассматриваемом случае, при внезапном расширении потока, никакой зависимости между коэффициентом сопротивления и числом Рейнольдса не обнаружено.

То обстоятельство, что в сечении I–I давление распределяется по закону гидростатики, позволяет нам использовать закон приращения количества движения для установления теоретической зависимости.

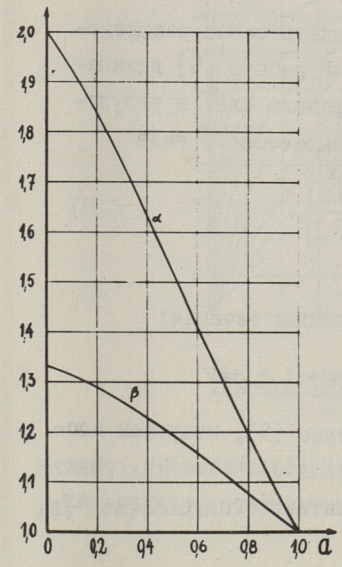
Для отсека потока жидкости между сечениями I–I и 2–2 (фиг. I) приращение количества движения за время $dt$ равно

$$\frac{\gamma}{g}\left(\int_{\omega_2} u_2^2 \, d\omega_2 - \int_{\omega_1} u_1^2 \, d\omega_1\right) dt. \qquad (3)$$

Проекция импульса внешних сил на ось потока:

$$p_1\omega_1 dt - p_2\omega_2 dt = (p_1 - p_2)\omega_2 dt, \qquad (4)$$

где $\omega$ – площадь сечения потока.




**Фиг. 3. Графики зависимости коэффициентов α и β от относительного радиуса ядра потока a**

На основе теоремы приращения количества движения получаем

$$\frac{\gamma}{g}\left(\int_{\omega_2} u_2^2 d\omega_2 - \int_{\omega_1} u_1^2 d\omega_1\right)dt = \\ = (p_1 - p_2)\omega_2 dt. \qquad (5)$$

Интервалы в левой части уравнения (5) можно выразить через средние скорости:

$$\frac{\gamma}{g}\int_{\omega_2} u_2^2 d\omega_2 = \beta_2 \rho v_2^2 \omega_2$$

и

$$\frac{\gamma}{g}\int_{\omega_1} u_1^2 d\omega_1 = \beta_1 \rho v_1^2 \omega_1, \qquad (6)$$

где $\beta$ – коэффициент количества движения.

После некоторых сокращений и подстановок уравнение (5) примет вид

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \beta_2 \frac{v_2^2}{g} - \beta_1 \frac{v_1 \cdot v_2}{g}. \qquad (7)$$

Сопоставив уравнение (7) с уравнением (I) и выполнив необходимые преобразования, получаем окончательное выражение для определения потерь напора при внезапном расширении потока бингамовской жидкости

$$h_м = \frac{\alpha_1 v_1^2 + (2\beta_2 - \alpha_2)v_2^2 - 2\beta_1 \cdot v_1 \cdot v_2}{2g}. \qquad (8)$$

Коэффициента $\alpha$ и $\beta$ (индекс обозначает сечение) в формуле (8) определяются по формулам

$$\alpha = \frac{\int_{\omega} u^3 d\omega}{v^3 \omega} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{\int_{\omega} u^2 d\omega}{v^2 \omega}. \qquad (9)$$

Для расчета этих коэффициентов нужно знать закон распределения скоростей в сечениях I–I и 2–2. В работе [5] доказана применимость модели Бингама для морского ила, в результате чего распределение скоростей описывается в виде

$$u = u_0 \left[ 1 - \frac{\left(\frac{r}{R} - a\right)^2}{(1-a)^2} \right], \qquad (10)$$

где $u_0$ – скорость ядра;
$r$ – координата градиентной зоны течения;
$R$ – радиус трубы;
$a$ – относительный радиус ядра потока.

Подставляя уравнение (10) в уравнение (9), получаем после интегрирования формулы для коэффициентов $\alpha$ и $\beta$, причем последние зависят только от относительного радиуса ядра потока

$$\alpha = \frac{54(47a^2 + 58a + 35)}{35(a^2 + 2a + 3)^3} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{12(4a^2 + 6a + 5)}{5(a^2 + 2a + 3)^2}. \qquad (11)$$

Полученные зависимости приведены на фиг. 3. Из (2) и (8) получаем значение коэффициента местного сопротивления

$$\xi = \left[ \alpha_1 + (2\beta_2 - \alpha_2)\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 2\beta_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \right], \qquad (12)$$

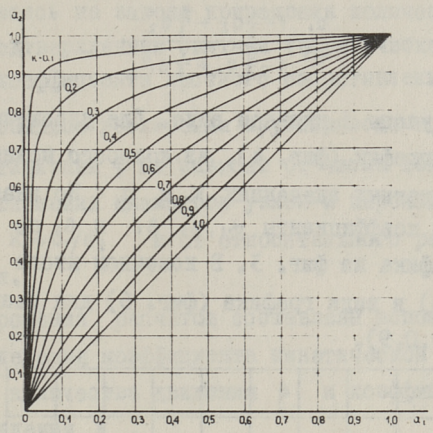
где $d$ – диаметр трубы.

Согласно полученной формуле коэффициент местного сопротивления не зависит от числа Рейнольдса.

Из теории бингамовского тела относительный радиус ядра потока вычисляется по формуле

$$a = \frac{r_0}{R} = \frac{\tau_0}{\tau_{max}} = \frac{2\tau_0}{\gamma R i}, \qquad (13)$$

где $r_0$ – радиус ядра потока;
$\tau_0$ – предельное напряжение сдвига;
$\tau_{max}$ – касательное напряжение на стенке трубы;
$i$ – гидравлический уклон.



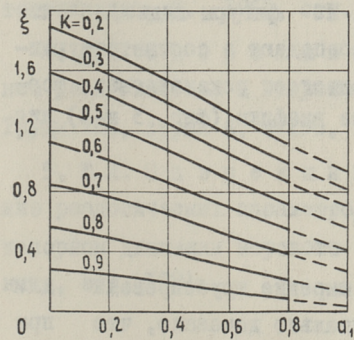

**Фиг. 4. График зависимости** $a_2 = f(a_1; K)$

Написав уравнение (I3) для узкой и широкой частей трубопровода, получаем из отношения $a_1/a_2$

$$a_2 = a_1 \frac{i_1 R_1}{i_2 R_2}. \qquad (I4)$$

Это обстоятельство позволяет выразить коэффициенты $\alpha_2$ и $\beta_2$ через $a_1$, в результате чего формула (I2) может быть переписана как зависимость

$$\xi = f\left(a_1; \frac{d_1}{d_2}\right). \qquad (I5)$$




**Фиг. 5. График зависимости** $\xi = f(a_1; K)$ **при внезапном расширении трубопровода**

Из формулы Бакингэма

$$v = \frac{\gamma i R^2}{8\eta}\left(1 - \frac{4}{3}a + \frac{1}{3}a^4\right)$$

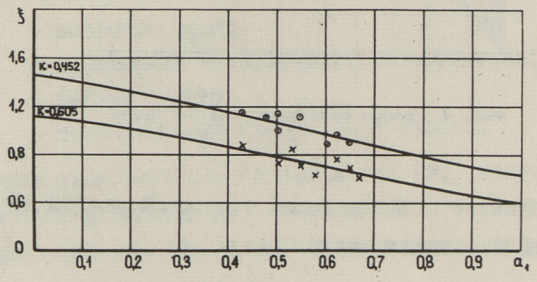
получаем величину соотношения $m = i_1/i_2$

$$m = \frac{1}{K^4} \cdot \frac{1 - \frac{4}{3}a_2 + \frac{1}{3}a_2^4}{1 - \frac{4}{3}a_1 + \frac{1}{3}a_1^4}. \qquad (I6)$$

Подставив (I6) в (I4), получаем следующую зависимость между $a_2$ и $a_1$:

$$a_2 = \frac{a_1}{K^3} \cdot \frac{1 - \frac{4}{3}a_2 + \frac{1}{3}a_2^4}{1 - \frac{4}{3}a_1 + \frac{1}{3}a_1^4}. \qquad (17)$$

Зависимость получена в неявном виде. Для упрощения расчетов нами составлен график (фиг. 4), из которого можно определить $a_2$ при заданных значениях K и $a_1$. По значениям $a_1$ и $a_2$ определяются коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ и $\beta_2$ по формулам (II) или из графика на фиг. 3. В конечном итоге получена зависимость (I5) в виде графика (фиг. 5) для разных значений K (0,2...0,9).




**Фиг. 6. Сравнение опытных данных с теоретической зависимостью**

На фиг. 6 эта же зависимость дана в виде двух кривых для опытных значений K = 0,605 и K = 0,452, а также показаны точки, отвечающие опытным данным. Из фигуры видно, что опытные точки удовлетворительно совпадают с соответствующими теоретическими кривыми. Это позволяет рекомендовать формулу (I5), а также вспомогательные графики (фиг. 3 и 5) для практических расчетов.

## Выводы

I. Исследовалось внезапное расширение трубопровода для бингамовской жидкости. Экспериментально доказано, что при внезапном расширении структурного потока ядро сохраняется, и в сечении расширения существует гидростатическое распределение давления.

2. Основываясь на законе приращения количества движения предложена подтвержденная опытами теоретическая формула для определения коэффициента местного сопротивления $\xi$.

3. При внезапном расширении трубопровода коэффициент местного сопротивления $\xi$ не зависит от числа Рейнольдса; $\xi$ зависит от отношения диаметров узкой и широкой частей трубопровода $K = d_1/d_2$ и от относительного радиуса ядра $a_1$ до расширения.

4. Для упрощения расчетов составлены вспомогательные графики определения коэффициента кинетической энергии $\alpha$, коэффициента количества движения $\beta$ и коэффициента местного сопротивления $\xi$.

## Литература


1. С.А. Егоров. Формула для потери напора на внезапное расширение трубы при ламинарном течении. Труды МАИ, вып. 2, 1946, стр. 3.

2. В.Н. Карев. Потери напора при внезапном расширении трубопроводов. Нефт. хоз., II, 1952, стр. 55.

3. Э.К. Латыпов, Б.С. Филатов. Новые исследования в области гидродинамики и реологии глинистых растворов. Сб. "Промывочные растворы для бурения скважин", Гостоптехиздат, М., 1962, стр. 143.

4. Ю.Я. Сяэрекыннно, Л.А. Тепакс. Исследование реологических и гидравлических свойств морского ила. Труды ТПИ, серия А, № 298, 1970, стр. 71.

5. Ю.Я. Сяэрекыннно, Л.А. Тепакс. Исследование реологических параметров и распределения скоростей при напорном движении морского ила. (см. статью настоящего сборника, стр. 133).

J.Saarekynno, L.Tepaks

## Calculation of the Tube Expansion Pressure-Losses for Plastic Flow of Sea Sludge

Summary

The formula (8) is derived for calculating the tube expansion pressure losses for plastic flow of sea sludge, considering coefficient of kinetic power $\alpha$ and momentum of the flow $\beta$. Coefficients $\alpha$ and $\beta$ are determined by the equations (9) being only the functions of the relative plug radius a.

For simplifying the pressure loss calculations equation (8) is turned into the well-known Weisbach's formula, where coefficient $\xi$ is described by the equation (12) or Fig.5.

The work was checked up experimentally and good results were obtained (Fig.6).

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 628.393

Л.Л. Пааль, Б.Г. Казарян

# О ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ ВЕЩЕСТВА ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РЕКАХ

При нестационарном поступлении вещества загрязнения в водоток определенное влияние на процесс самоочищения реки оказывает продольная турбулентная диффузия. Этот процесс в реках исследовался нами уже в течение многих лет, в результате чего получены соответствующие закономерности для практических расчетов [1 , 2 , 3] и др. Установлено, что интенсивность процесса продольной диффузии зависит в основном от гидравлических характеристик русла реки и ускорить этот процесс можно только применяя инженерные мероприятия.

В 1968-1969 гг. в Армянском научно-исследовательском институте водных проблем и гидротехники были организованы лабораторные исследования для изучения возможности ускорения процесса продольной турбулентной диффузии вещества загрязнения. Для этой цели был оборудован деревянный лоток длиной 24 м с прямоугольным поперечным сечением в размере 20 x 15 $см^2$. На расстоянии 20 м от начала лоток был выполнен в виде расширения с размерами в плане 1 x 1 $м^2$. Такая схема течения была условно названа "река-пруд-река".

Методика экспериментов заключалась в мгновенном впуске на 6-ом метре лотка раствора поваренной соли с концентрацией 100 г/л. Изменение концентрации соли осуществлялось

при помощи специально изготовленных и оттарированных датчиков, фиксирующих электропроводность воды. Датчики были установлены в трех створах: I - на II-ом, П - на I9-ом (до пруда) и Ш - на 22-ом (после пруда) метрах лотка. Показания датчиков регистрировались при помощи осциллографа Н-700.

Всего было проведено 8I серия опытов с одновременной записью показаний всех трех датчиков и получены 293 кривых вида $S = f(t)$, где $S$ - концентрация соли и $t$ - время. Эксперименты проводились при различных расходах, шероховатостях русла, уклонах и при различном отношении ширины пруда $B$ к его длине $L$.

Для получения достоверных результатов при каждой серии опытов с неизменными гидравлическими показателями проводились повторные опыты, которые выявили достаточную стабильность показаний датчиков при подобных опытах.

Полученные в лабораторных условиях экспериментальные данные позволяют проверить ранее выведенные формулы для определения величины коэффициента продольной диффузии и разработать рекомендации для проектирования прудов, чтобы улучшить влияние продольной диффузии вещества загрязнения в реках.

Коэффициент продольной диффузии определялся по формуле Фишера [4]

$$K_x = \frac{v^2}{2} \frac{\sigma_{t2}^2 - \sigma_{t1}^2}{t_2 - t_1}, \qquad (I)$$

где $v$ - средняя скорость потока;

$t_i$ - время добегания воды до створа $i$ ($i = 1,2$);

$\sigma_t^2$ - дисперсия, которая определяется по формуле

$$\sigma_t^2 = \frac{\Sigma S_i t_i^2}{\Sigma S_i} - \left(\frac{\Sigma S_i t_i}{\Sigma S_i}\right)^2. \qquad (2)$$

Полученные по формуле (I) величины коэффициента продольной диффузии хорошо сочетаются с формулой, разработанной в Таллинском политехническом институте, которая для лабораторных условий имеет вид [5]:

$$\frac{K_x}{Ru_*} = \frac{3400}{\sqrt{Re}}, \qquad (3)$$

где $R$ – гидравлический радиус русла;

$u_* = \sqrt{gRJ}$ – динамическая скорость;

$J$ – гидравлический уклон;

$Re = \frac{vR}{\nu}$ – число Рейнольдса.

Для определения коэффициента продольной диффузии в условиях малых рек рекомендуется использовать формулу в виде [5]

$$\frac{K_x}{Ru_*} = 16{,}0 \left(\frac{v}{u_*}\right)^{1{,}25}. \qquad (4)$$

Чтобы увязать методику определения коэффициента продольной диффузии в руслах постоянного поперечного сечения с величиной этого коэффициента в руслах с переменным поперечным сечением, был проведен анализ имеющихся экспериментальных данных. Целью исследования при этом является определение отношения, показывающего, во сколько раз увеличивается коэффициент продольной диффузии при наличии в реке пруда. Анализ полученных результатов приводит к выводу, что отношение $\frac{K_{xn}}{K_{xp}}$ выражается в следующем виде:

$$\frac{K_{xn}}{K_{xp}} = 71{,}5 \frac{v}{u_*}\sqrt{J}, \qquad (5)$$

где $K_{xn}$ – коэффициент продольной диффузии при наличии пруда;

$K_{xp}$ – коэффициент продольной диффузии в русле с постоянным поперечным сечением.

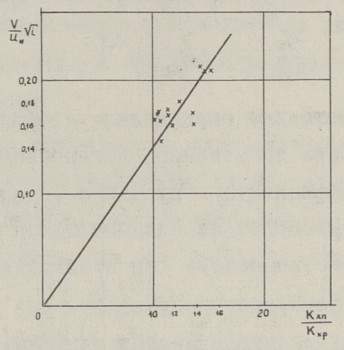
Закономерность по формуле (5) и соответствующие опытные точки показаны на фиг. I. По формуле (5) нетрудно определить коэффициент продольной диффузии, характеризующий влияние пруда на процесс самоочищения.

Кроме коэффициентов продольной диффузии определялось также влияние ширины пруда на понижение максимальной концентрации вещества. Анализом опытных данных установлено, что наилучшим отношением ширины $B$ и длины $L$ пруда является

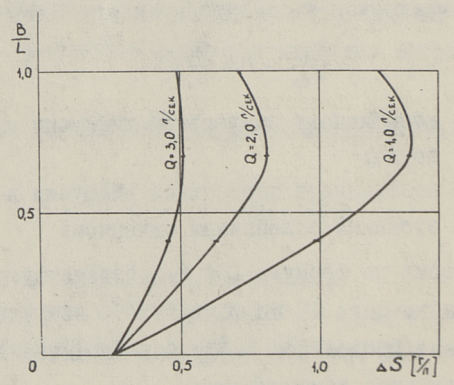
$\frac{B}{L}$ = 0,70 (см. фиг. 2 и 3). На фиг. 2 показано понижение максимальной концентрации

$$\Delta S_{max} = S^{II}_{max} - S^{III}_{max}, \qquad (6)$$

где $S^{II}_{max}$ и $S^{III}_{max}$ – максимальная концентрация в створах до и после пруда.



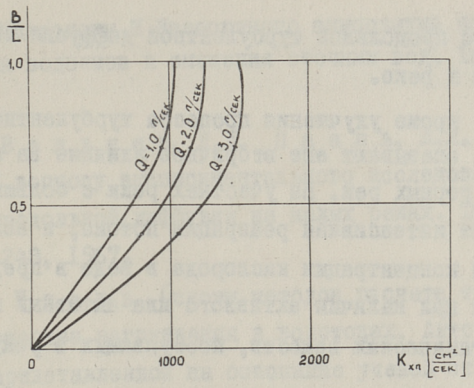

**Фиг. 1. Зависимость** $\frac{K_{xn}}{K_{xp}} = f\left(\frac{V}{U_*}\sqrt{J}\right)$




**Фиг. 2. Влияние отношения $\frac{B}{L}$ на снижение максимальной концентрации в пределах пруда при J = 0,0010 = const**

Результаты, приведенные на фиг. 2, получены при постоянном гидравлическом уклоне J , равном 0,001.

Изменение величины $K_{xn}$ в зависимости от $\frac{B}{L}$ приведено на фиг. 3. Результаты показывают, что величина $K_{xn}$ увеличивается




**Фиг. 3. Влияние отношения $\frac{B}{L}$ на величину $K_{xп}$ при J = 0,0010 = const**

очень интенсивно до $\frac{B}{L} = 0,7$, а далее увеличение минимальное.

Практический интерес представляет определение влияния пруда на снижение максимальной концентрации вещества $S_{max}$ после прохождения воды через пруд. Расчет распределения концентрации во времени в данном створе реки в условиях продольной диффузии следует провести до пруда, применяя в качестве коэффициента диффузии $K_{xp}$. Для определения распределения концентрации вещества после пруда следует ввести в расчет средний коэффициент продольной диффузии, который определяется по формуле

$$K_{xcp} = \frac{K_{xp} t_p + K_{xп} t_п}{t_p + t_п} , \qquad (7)$$

где $t_p$ – время добегания воды от створа выпуска до пруда;

$t_п$ – время прохождения воды через пруд.

Таким образом, общее время процесса диффузии от выпуска до створа после пруда определяется как сумма $t_p + t_п$. Если требуется определить влияние пруда на понижение концентрации вещества, то расчет проводится для створов до и после пруда. Разница полученных результатов дает нам эффект пруда

на процесс продольной турбулентной диффузии вещества загрязнения в реке.

Пруды кроме улучшения процесса турбулентной диффузии вещества оказывают еще вторичное влияние на процесс самоочищения горных рек. На участках реки с большим уклоном происходит интенсивная реаэрация потока, и вследствие достаточной концентрации кислорода в воде в пределах прудов ожидается при наличии активного ила активный процесс окисления органических веществ, поступающих в реку со сточными водами.

Для проведения расчета самоочищения рек все предлагаемые закономерности действительны; для определения коэффициента $K_{xp}$ рекомендуется применять формулу (4), которая получена на основе натурных исследований.

Приведенная методика расчета влияния пруда дает возможность обоснованного учета и усиления процессов самоочищения при расчетах допустимой нагрузки водотоков, а также возможность разработки водоохранных мероприятий.

Все это позволяет значительно улучшить санитарное состояние горных рек без подачи дополнительного количества чистой воды для разбавления сбросов и ликвидации пиков загрязнения, возникающих из-за нестационарного впуска сточных вод.

## Литература


I. А.М. Айтсам, Х.А. Вельнер, Л.Л. Паальъ. О расчете продольного смешения вещества загрязнения в водотоках. Труды ТПИ, серия А, № 247, 1967.

2. Л.Л. Паальъ. О расчете смешения сточных вод при некоторых эпюрах загрузки водотоков. Труды ТПИ, серия А, № 247, 1967.

3. Л.Л. Рохусаар, Л.Л. Паальъ. К вопросу определения коэффициента продольной диффузии в открытых

водотоках. Материалы III Всесоюзного симпозиума по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин-Москва, 1969.

4. Х.А. В е л ь н е р, Л.Л. П а а л ь, Л.Л. Р о х у - с а а р. К вопросу экспериментального исследования коэффициента продольной диффузии на малых реках. Труды ТПИ, серия А, № 248, 1967.

5. Л.Л. П а а л ь. Основы методов расчета турбулентной диффузии вещества загрязнения в водотоках. Автореферат диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, Ленинград, 1971.

L. Paal, S. Kazaryan

On the possibility of ameliorating longitudinal diffusion of pollutants in rivers

Summary

This paper treats of experiments carried out in laboratory conditions by the scheme "river-pond-river", the pond being a widened section of the river. On the basis of the experiments the regularities are given for calculating the coefficient of longitudinal diffusion and the reduction of the maximum concentration of pollutants within the pond. 0.7 should be considered to be the best relation of the width and the length of the pond.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 628.31

Б.Г. Казарян

# О МЕТОДИКЕ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА СКОРОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ВОДОТОКАХ

Проблема охраны водных ресурсов от загрязнения в настоящее время приобретает общегосударственное значение. Сохранение водоемов в должном санитарном состоянии не может быть достигнуто лишь строительством очистных сооружений, усовершенствованием способов очистки отдельных ингредиентов сточных вод, использованием стоков в сельском хозяйстве, усовершенствованием технологии производства с целью уменьшения водопотребления или выполнением санитарных мероприятий частного характера [4].

Одним из методов улучшения создавшегося положения может явиться более точный и обоснованный учет и использование процессов самоочищения водотоков.

Для изучения закономерностей процессов самоочищения рек в Армянском научно-исследовательском институте водных проблем и гидротехники в 1964 г. ведутся натурные исследования над некоторыми водотоками республики (реки Раздан, Памбак, Ахурян, Вохчи, Агстев и Гавараget) [3, 6]. Указанные водотоки выбирались типичными для отдельных районов Армении и охватывали горные, предгорные и равнинные участки рек. Выбранные участки были обследованы и определены гидравлические (морфометрические) показатели их русел: уклон – $i$, скорость – $V$, расход – $Q$, глубина – $H$, диаметр частиц выкладки дна и берегов – $d$, наличие водной растительности и пр. (таблица I).

Таблица I

| № п.п. | Река | Участок ниже города | $i_{ср}$ | $V_{ср}$ м/сек | $H_{ср}$ м | $Q_{ср}$ м³/сек | $d_{ср}$ мм | $L_{уч}$ км |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I. | Вохчи | Кафан | 0,0310 | I,25 | 0,50 | 2,5 | 400 | I2,5 |
| 2. | Памбак | Кировакан | 0,0130 | 0,80 | 0,70 | 3,0 | 55 | I2,0 |
| 3. | Раздан | Ереван | 0,0022 | 0,35 | 0,30 | 2,3 | 45 | 25,0 |
| 4. | Агстев | Дилижан | 0,0250 | 0,70 | 0,40 | I,5 | 50 | 6,3 |
| 5. | Памбак | Спитак | 0,0084 | 0,50 | 0,30 | 0,8 | 70 | 9,0 |
| 6. | Ахурян | Ленинакан | 0,0025 | 0,35 | 0,85 | I2,0 | 2 | 6,5 |
| 7. | Гавараг-гет | Камо | 0,0028 | 0,30 | 0,60 | I,3 | I | 6,0 |
| 8. | Раздан | кур.Арзни | 0,0159 | 0,75 | 0,30 | 0,7 | I00 | I3,0 |

Эксперименты проводились в период летней межени (наиболее опасной с точки зрения загрязненности) на участках ниже створов полного смешения, определенных на основании натурных экспериментов [3, 6].

Методика исследований заключалась в отборе проб воды из речных створов для определения биологической потребности в кислороде ($БПК_I$, $БПК_2$,...$БПК_6$) и растворенного кислорода ($O_2$). Пробы отбирались с учетом времени добегания воды для ведения наблюдений над изменением ее качества в процессе протекания по руслу. Всего было отобрано I78 проб воды (в том числе из р.Раздан - 96, р. Памбак - 36, р. Вохчи - I2, р. Агстев - 6, р. Ахурян - I6 и р. Гаварагет - I2) и поставлено свыше 900 анализов, которые производились по стандартной методике, причем для получения достоверных результатов каждый анализ дублировался.

На основании полученных значений БПК вдоль рек можно судить о динамике процессов биохимического окисления органических загрязнений, которая характеризуется коэффициентом $K_I$, определяемым стандартными скляночными опытами в лабораторных условиях по методу Фельпса-Стритера, исходящему из мономолекулярности процесса:

$$K_I = \frac{1}{t} \lg \frac{L_A}{L_B} \left[\frac{1}{сут}\right], \qquad (I)$$

где $L_A$ и $L_B$ – БПК в начале и конце рассматриваемого промежутка времени $t$ (сут.)

До недавнего времени считалось, что коэффициент скорости окисления $K_I$ в лабораторных условиях равен тому же коэффициенту K для натурных условий. Принимая равенство $K_I = K$, допускается большая ошибка, так как в натуре на понижение БПК влияют кроме окисления также процессы превращения, осаждения, смешения, потребления микроорганизмами (живыми агентами самоочищения) органического вещества и т.д. Эта ошибка тем значительнее, чем меньше статические лабораторные условия соответствуют динамическим натурным, что особенно заметно для малых горных рек.

Вельц, Ганнон [II] и др. предлагают определять суммарный коэффициент скорости превращения органических веществ, применяемый при расчетах самоочищения, как

$$K = K_I + K^I, \qquad (2)$$

где $K_I$ и $K^I$ – соответственно статическая (лабораторная) и динамическая (натурная) составляющие коэффициента скорости превращения.

Вельнер Х.А., Айтсам А.М. [I] на основе анализа размерностей представляют динамическую составляющую процесса самоочищения в универсальном виде:

$$K^I = \frac{V}{R} \cdot f\left(Re_\nu, Re_D, \frac{B}{R}, \frac{\Delta}{R}\right), \qquad (3)$$

где $$Re_\nu = \frac{V \cdot H}{\nu}; \quad Re_D = \frac{V \cdot H}{D};$$

$V$ – скорость течения потока;
$H$ – глубина воды;
$B$ – ширина русла;
$R$ – гидравлический радиус;
$\Delta$ – линейный размер шероховатости русла;
$D$ – коэффициент турбулентной диффузии;
$\nu$ – кинематический коэффициент вязкости.

Задачей настоящей работы является отыскание зависимостей для статической и динамической составляющих суммарного коэффициента скорости превращения.

Статические составляющие коэффициента скорости превращения $K_I$ определены на основе анализов проб воды, инкубированных на различные сроки.

Проведенные исследования позволили в первом приближении подразделить значения $K_I$ в зависимости от характера сточной воды. При расчетах качества воды для условий Армянской ССР рекомендуется при +20 $^{o}$C принимать следующие величины $K_I$:

I) для смешенных стоков городов и предприятий пищевой промышленности $K_I$ = 0,3 I/сут;

2) для хозяйственно-бытовых стоков $K_I$ = 0,2 I/сут;

3) для стоков предприятий химической и текстильной промышленности $K_I$ = 0,I I/сут;

4) для стоков предприятий, ссдержащих токсические вещества, $K_I$ < =0,0I I/сут.

Следует отметить, что указанные величины $K_I$ ориентировочные и подлежат в дальнейшем уточнению.

Величины суммарных коэффициентов скорости превращения К рассчитаны по фактическим значениям БПК в речных створах. Динамические же составляющие $K^I$ найдены по уравнению (2) путем уменьшения суммарного коэффициента превращения К на величину его статической составляющей $K_I$.

Как показал анализ опытных данных, для всех исследованных участков рек величина $K^I$ уменьшается во времени [6], что показано и в работах [2 , 9 , I0] и др. Это уменьшение выражается зависимостью вида:

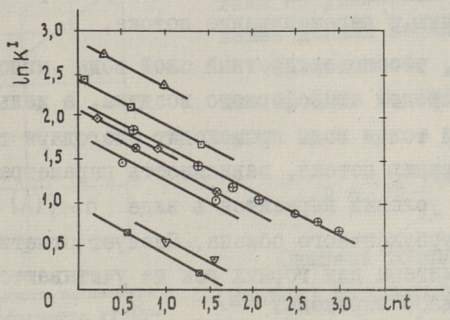
$$K^I = a \cdot t^{-b} \left[\frac{1}{сут}\right], \qquad (4)$$

где a и b – параметры, определяемые экспериментальным путем.

Зависимость (4) показывает, что процесс превращения орга-

нических веществ в водотоках протекает по бимолекулярной или еще более сложной зависимости [2 , 9 , IO , II] и др.

Указанная зависимость для участка р. Раздан приведена в табличном виде в [6] и представлена графической зависимостью $\ln K^I = f(\ln t)$ в виде прямой линии в работе [2].




Фиг. 1 . Динамика коэффициента $K^1$ во времени:

△ – р. Вохчи, ▫ – р. Памбак (Кировакан), ⊕ – р. Раздан(Ереван), ◈ – р. Агстев, ⊙ – р. Памбак (Спитак), ▽ – р. Ахурян, ⊠ – р. Гаварагет, ⊗ – р. Раздан (Арзни)

На фиг. I даны зависимости коэффициента скорости превращения от времени $t$ (час), причем величины $K^I$, отложенные на графике, получены для каждого створа исследованных участков рек как осредненные по нескольким измерениям. По графикам на фиг. I определены значения параметров $a$ и $b$ (таблица 2).

Таблица 2

Значения параметров $a$ и $b$ для изученных рек

| Параметр \ Река | Вохчи | Памбак Кировакан | Раздан Ереван | Агстев | Памбак Спитак | Ахурян | Гаварагет | Раздан Арзни |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a | I8,2 | II,3 | 9,0 | 8,4 | 5,3 | 3,I | 2,5 | 7,4 |
| b | 0,5I | 0,50 | 0,52 | 0,50 | 0,48 | 0,49 | 0,5I | 0,52 |

Величина $b$ почти постоянная и в дальнейших расчетах будет приниматься равной 0,5.

Зависимость (4) примет вид:

$$K^1 = \frac{a}{t^{0,5}} \left[\frac{1}{сут}\right], \qquad (5)$$

где $t$ – в час.

Анализ экспериментальных материалов показал, что параметр $a$ зависит от гидравлических характеристик, определяющих аэрацию и перемешивание потока.

Учитывая, что поверхностный слой воды мгновенно насыщается кислородом атмосферного воздуха, а дальнейшее насыщение всей толщи воды происходит благодаря турбулентному перемешиванию потока, зависимость параметра $a$ от гидравлических условий выразится в виде $a = f(A)$ где $A$ – коэффициент турбулентного обмена. Следует отметить, что процессы фотосинтеза для горных рек не учитываются, так как здесь они слабо выражены.

Коэффициент турбулентного обмена определяется по А.В. Караушеву [7] в виде:

$$A = \gamma \frac{H.V}{M.C}, \qquad (6)$$

где $\gamma$ – удельный вес воды;
$H$ – средняя глубина;
$V$ – средняя скорость;
$C$ – коэффициент Шези;
$M$ – параметр, зависящий от C, определяемый как

$$M = 2.C^{0,76}. \qquad (7)$$

Коэффициент Шези по [7] представляется в виде функции относительной шероховатости $\frac{d}{H}$ ( $d$ – средний диаметр частиц донных отложений в мм):

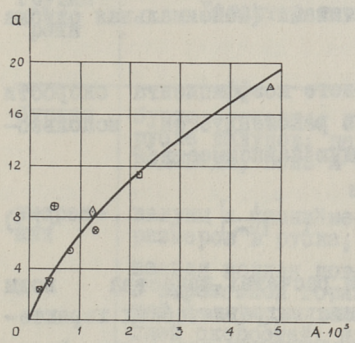
$$C = 10,5 \sqrt{g} \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{\frac{1}{6}}. \qquad (8)$$

После подстановки значений M и C формула коэффициента турбулентного обмена (6) принимает следующий вид:

$$A = \frac{\gamma . H^{0,707} . V . d^{0,293}}{936}, \qquad (9)$$

где H – измеряется в м, V – в м/сек, а d – в мм.

На фиг. 2 приводится зависимость вида $a = f(A)$ для исследованных участков рек.




Фиг. 2. Зависимость параметра a от коэффициента турбулентного обмена A.

Значения параметра a взяты из таблицы 2, а коэффициенты турбулентного обмена A рассчитаны по уравнению (9) на основании данных таблицы I.

Зависимость, представленная на фиг. 2, имеет следующий вид:

$$a = 708 \cdot A^{0,675}. \qquad (10)$$

Опытная точка для р.Раздан (Ереван) находится за пределами зависимости на фиг. 2, что объясняется специфическими особенностями течения. Благодаря наличию в русле чередующихся расширенных (прудовых) и быстроточных участков, процессы самоочищения [6] и продольной турбулентной диффузии значительно интенсифицируются [5].

Из-за совместного действия комплекса факторов значение параметра a и, следовательно, коэффициента $K^I$ в 2,25 раза больше ожидаемого.

Таким образом, для ускорения процессов самоочищения в реках рекомендуется создавать в русле небольшие расширения, чередующиеся с быстротечными участками в каждые 100–150 м (как показал опыт р. Раздан ниже г. Еревана).

Подставляя значение A по (9), зависимость (10) примет вид:

$$a = 7 \cdot H^{0,476} \cdot V^{0,675} \cdot d^{0,198}, \qquad (11)$$

а уравнение (5) для определения величины динамической составляющей коэффициента скорости превращения органических загрязнений можно переписать в виде:

$$K^I = 7 \frac{H^{0,476} \cdot V^{0,675} \cdot d^{0,198}}{t^{0,5}} \left[\frac{1}{сут}\right], \qquad (12)$$

где H измеряется в метрах, V – в м/сек, d – в мм, t – – час.

Зависимость (I2) представляет собой частный случай универсального уравнения (3) и для условий Армении дает хорошую сходимость в натурными величинами (максимальная ошибка составляет ± II %).

При расчетах величины суммарного коэффициента скорости превращения органических веществ рекомендуется использовать для условий Армении следующую зависимость:

$$K = 7\,\frac{H^{0,476} \cdot V^{0,675} \cdot d^{0,198}}{t^{0,5}} + K_I \left[\frac{1}{сут}\right]. \qquad (I3)$$

В практике проектирования при расчетах качества воды возможны случаи, когда определение гидравлических характеристик в уравнении (I2) не представляется возможным. В таких случаях одним из известных в гидрологии методов можно определить только скорость течения.

Как было показано выше, параметр $\alpha$ зависит от гидравлических характеристик, определяющих аэрацию и перемешивание потока, а также скорости течения. При сопоставлении параметров $\alpha$ и величин скоростей (таблицы I и 2) между ними наблюдается прямая связь:

$$\alpha = cV, \qquad (I4)$$

где c – коэффициент, зависящий от характера течения и степени аэрации.

Подробное изучение конкретных условий течения различных участков водотоков республики позволило разграничить их в первом приближении по интенсивности течения, аэрации, уклонам и др. факторам на 3 группы (таблица 3).

Классификация рек по таблице 3 хорошо согласуется с типизацией рек по условиям перемешивания, предложенной А.В. Караушевым и др. [8].

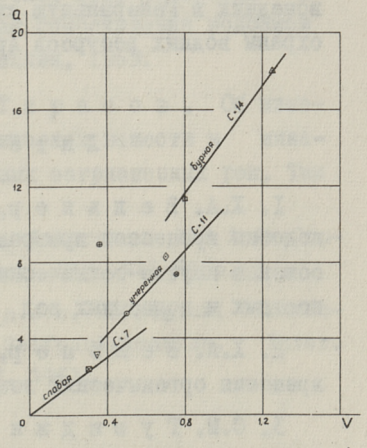
На основании таблиц 2 и 3 ниже приводится зависимость параметра $\alpha$ от скорости течения потока, раздельно для вышеуказанных групп (фиг. 3).

Таблица 3

Классификация рек

| Группа реки | Характер течения | $V_{ср}$ м/сек | $i_{ср}$. | Коэф. турб. обмена A |
|---|---|---|---|---|
| бурная | бурное течение; наличие в русле валунов; перекаты; водопады; пена и брызги; | более 0,7 | более 0,010 | более 0,0018 |
| умеренная | валуны и камни меньших размеров в русле; изрезанная водная поверхность с выраженной горизонтальной и вертикальной пульсацией скоростей; извилистая береговая линия; интенсивное перемешивание. | от 0,3 до 1,0 | от 0,002 до 0,015 | от 0,0003 до 0,0022 |
| слабая | гладкая водная поверхность; заиленное русло; слабое перемешивание | менее 0,6 | менее 0,008 | менее 0,0006 |

На графике прямые сходятся в точке начала координат. Это объясняется зависимостью (I4), а также тем, что при $V = 0$ процесс окисления органических веществ в натуре протекает в условиях, подобных лабораторным (с коэффициентом скорости $K_T$). Факт соответствия двух значений параметра $a$ одной и той же скорости не противоречит действительности и имеет место при различных условиях протекания водотоков (расход, шероховатость, вид береговой линии, продольный профиль русла и т.д.).




Фиг. 3. Зависимость параметра a от скорости потока и степени аэрации.

Согласно графику, коэффициент С для рек с бурной аэрацией равен I4, с умеренной - II и со слабой - 7.

Таким образом, для приближенного расчета величины суммарного коэффициента скорости превращения К рекомендуется использовать следующие уравнения для соответствующих групп рек, приведенных в таблице 3:

бурная $$K = 14 \cdot \frac{V}{\sqrt{t}} + K_I \quad \left[\frac{1}{сут}\right],$$

умеренная $$K = 11 \cdot \frac{V}{\sqrt{t}} + K_I \quad \left[\frac{1}{сут}\right], \qquad (15)$$

слабая $$K = 7 \cdot \frac{V}{\sqrt{t}} + K_I \quad \left[\frac{1}{сут}\right],$$

где $t$ измеряется в часах.

Расхождение натурных данных с рассчитанными по формуле (I5) составляет $\pm$ 20 %, что вполне приемлемо для практических расчетов.

Вышеизложенная методика была использована в расчетах по прогнозированию качества воды водотоков на перспективу, а также при разработке необходимых водоохранных мероприятий, вошедших в Генеральную схему комплексного использования и охраны водных ресурсов Армянской ССР.

## Литература

I. Х.А. Вельнер, А.М. Айтсам. О критериях подобия процессов превращения органических веществ. Всесоюзная научно-техническая конференция по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Таллин, I967.

2. Х.А. Вельнер, Р.В. Плато. О динамике превращения органических веществ в малых реках. Там же.

3. С.М. Гурюмджян, Б.Г. Казарян, Э.Х. Казарян. К вопросу смешения и самоочищения сточных вод в условиях Армянской ССР. Труды Арм НИИВПиГ, т. I(УI), Ереван, I967.

4. С.М. Гулюмджян, Б.Г. Казарян, Э.Х.Казарян, М.С. Торгомян. Некоторые характеристики современного состояния загрязненности водотоков Армянской ССР. Там же.

5. Б.Г. Казарян. Модельное исследование процесса продольной диффузии в потоке при схеме "река-пруд-река". Материалы III Всесоюзного симпозиума по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод, Москва-Таллин, 1969.

6. Б.Г. Казарян. О некоторых особенностях процессов смешения и самоочищения водотоков в условиях Армянской ССР. Всесоюзная научно-техническая конференция по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения, Таллин, 1967.

7. А.В. Караушев. О некоторых аспектах проблемы смешения сточных вод и самоочищения потоков. Материалы по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод, Таллин, 1965.

8. А.В. Караушев, Г.А. Петухова, Т.Н.Филатова, А.Я. Шварцман. Типизация рек и водоемов по условиям перемешивания сточных вод. Материалы III Всесоюзного симпозиума по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод, Москва-Таллин, 1969.

9. И.В. Семенов, М.Н. Тарасов. Об изменении скорости превращения органических веществ и минеральных форм азота на примере южных загрязненных рек. Там же.

10. J.J. Gannon. River and Laboratory BOD Rate Considerations. Journ. of the San. Eng. Div. SAI 1966.

11. C.J. Velz, J.J. Gannon. Biological Extraction and Accumulation in Stream Selfpurification. Inter. J. Air and Water Pollut. No. 6-7, 1963.

B. Kazaryan

## On the methods of engineering calculation of the conversion coefficient of organic substances in streams

Summary

This paper gives an account of the results of investigating the coefficient of oxidation speed of organic substances in nature. It has been established that this coefficient is not a constant and depends on the duration of the process. The relation is given between the coefficient mentioned and the hydraulic parameters of the riverbed (depth, mean velocity of flow, absolute roughness). Calculation formulas are suggested for determining the value of the coefficient of transformation velocity of organic substances in mountain rivers.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 628.393

В.А.Сууркаск, М.А.Тутт

# О КОЭФФИЦИЭНТАХ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В РАСЧЕТАХ СМЕШЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД В ВОДОТОКАХ

В качестве исходного теоретического уравнения при прогнозировании трансформации волны загрязнения в водотоках используется общее полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии [I, 2, 3]. Коэффициенты турбулентной диффузии принимаются при этом скалярами, и их величины определяют по гидравлическим параметрам потока.

Для упрощения инженерных расчетов смешения сточных вод в водотоках многими авторами коэффициенты диффузии принимаются равными для всех направлений пространства, т.е.

$$e_x = e_y = e_z$$

(обозначая коэффициент турбулентной диффузии через $e$, принимаем ось $x$ в направлении основного течения; ось $y$ – поперек течения и ось $z$ – вертикальной).

Как показывают исследования процесса турбулентной диффузии, это предположение, которое вполне справедливо для идеализированной изотропной и однородной турбулентности, не всегда оправдано в практических расчетах.

I. Продольная диффузия.

Особенности продольного рассеяния были теоретически проанализированы в работах Г.М. Тэйлора. Работы Тэйлора привлекли большой интерес к рассматриваемому явлению, и на сегодняшний день опубликован уже целый ряд новых теоретических и экспериментальных исследований продольной диффузии в трубах и открытых каналах. Одним из важных результатов этих

исследований для инженерных расчетов является определение величины эффективного коэффициента продольной диффузии, или коэффициента дисперсии (этот термин встречается в зарубежных работах). Оказывается, что вследствие градиента скорости создается более интенсивный перенос в продольном направлении и величина коэффициента диффузии (эффективного коэффициента, характеризующего суммарный перенос примеси вследствие турбулентной пульсации и градиента скорости) во много раз превосходит величину коэффициента турбулентной диффузии.

В случае продольного распространения большая интенсивность переноса порождается разностями скоростей $\bar{u}(y) - v_{ср}$ (где $\bar{u}(y)$ – осредненная по времени скорость с координатой y ;

$v_{ср}$ – средняя скорость течения, определяемая как $Q/\omega$;
где Q – расход водотока и $\omega$ – живое сечение водотока).

Это заметно превосходит турбулентную пульсацию продольной скорости

$$u'(y) = u(y) - \bar{u}(y).$$

Элдер [4] получил следующую теоретическую формулу для определения коэффициента продольной дисперсии:

$$K_x = 5{,}93\, H u_*, \qquad (I)$$

где H – глубина потока;
$u_* = \sqrt{gRJ}$ – динамическая скорость потока;
g – ускорение тяжести;
R – гидравлический радиус;
J – гидравлический уклон.

Экспериментальными исследованиями установлено, что величина множителя $\alpha_1 = \frac{K_x}{H u_*}$ не является постоянной, а колеблется в больших пределах в зависимости от конкретных условий водотока. Х.Б. Фишер в лабораторных экспериментах получил для $\alpha_1$ от 6,8 до 21,4 и в натуре от 50 до 535. Распределение скорости в природных водотоках колеблется в больших пределах, а также надо учесть еще влияние растительности, изменчивости формы русла и т.д. Таким образом, оценить величину коэффициента продольной дисперсии можно на базе экспериментальных исследований. Для малых рек Эс-

тонии Л. Пааль и Л. Рохусаар получили следующую приближенную формулу:

$$K_x = 1{,}5\, B v_{ср}, \qquad (2)$$

где B – ширина русла.

Как уже отмечалось, $K_x >> e_x$, и поэтому определению коэффициента продольной диффузии $e_x$ уделялось меньше внимания. Сэйре и Чанг получили величину $\alpha_2 = \frac{e_x}{Hu_*}$, равную 0,5.

2. Поперечная диффузия.

Исследованию поперечной диффузии посвящен ряд работ многих авторов. В основном эксперименты проводились в лабораторных условиях. Величина множителя $\alpha_3 = \frac{e_y}{Hu_*}$ получается от 0,10 до 0,25 для лабораторных потоков и $\alpha_3 \cong 0{,}9$ для извилистых натурных водотоков. На основе экспериментов в НИ лаборатории санитарной техники ТПИ можно $e_y$ определить для прямолинейных потоков по формуле Элдера

$$e_y = 0{,}23\, Hu_*. \qquad (3)$$

При извилистых потоках следует учесть влияние поперечных циркуляционных течений на перенос примеси. Создается аналогичная продольной дисперсии картина, где надо учитывать суммарный перенос, создаваемый градиентом скорости и диффузией переноса примеси.

3. Вертикальная диффузия.

Коэффициент вертикальной диффузии $e_z$ получается теоретически из формулы распределения скорости по вертикали. В.М. Маккавеев из общего дифференциального уравнения диффузии, используя параболическое распределение скорости, получил:

$$e_z = \frac{gHv_{ср}}{2mC} \qquad (4)$$

где C – коэффициент Шези;
g – ускорение тяжести;
m – коэффициент, принимаемый по Базену равным 24 или по Буссинеску – 22,3.

В своей работе Элдер [4] предполагает, что профиль скоростей в открытом канале дается логарифмической формой "закона

дефекта скорости" с постоянной Кармана $\varkappa = 0{,}41$. Коэффициент турбулентной диффузии $e_z$ определяется с помощью аналогии Рейнольдса, и получается следующая зависимость:

$$e_z = 0{,}068\, Hu_*. \qquad (5)$$

Проделав незначительные преобразования и определив постоянные, нетрудно убедиться, что величины коэффициента $e_z$, вычисленные по формулам (4) и (5), получаются почти равными, то есть

$$0{,}068\, Hu_* \cong \frac{gHv_{cp}}{2mC}. \qquad (6)$$

Таким образом, $\alpha_y = \dfrac{e_z}{Hu_*}$ получается примерно 0,07.

## Выводы

1. Экспериментальное исследование турбулентной диффузии доказало, что в реальных потоках $e_x \neq e_y \neq e_z$.

2. Для инженерных расчетов наибольший интерес представляют эффективные коэффициенты диффузии (или дисперсии). При залповом и нестационарном впуске вещества загрязнения продольная дисперсия играет основную роль в трансформации волны загрязнения. При стационарном впуске смешение создается поперечной и вертикальной турбулентной диффузией.

3. Поперечный перенос в натуре при извилистых водотоках требует новых экспериментальных исследований. Первые исследования в этой области выполнены М.А.Бесценной. Натурные исследования должны дать приближенные формулы для определения суммарного коэффициента поперечной дисперсии для применения его в инженерных расчетах.

4. Мало исследован также вертикальный перенос примеси в водотоках, который при глубоких водотоках также играет существенную роль в процессе смешения.

## Литература

I. Научные доклады по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. I Всесоюзный симпозиум. Таллин, 1965.

2. В.А. Суркаск, Л.Л. Паальъ. О процессе турбулентной диффузии в струйной части при впуске вещества загрязнения в водоток. Труды ТПИ, серия А, № 298, Таллин, 1970.

3. E.A. Pryc h. Effects of density differences on lateral mixing in open-channel flows. California, 1958.

4. J.W. Elder. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, J. of Fluid Mech. 5. 1958.

V. Suurkask, M. Tutt

About the turbulent diffusion coefficients in predicting the pollutant mixing in streams

Summary

In natural streams turbulent diffusion is one of the principal mechanisms by which the pollution is dispersed in the flow.

This paper describes the empirical formulas for calculating the diffusion coefficients, which are of great significance to practical application in hydraulic engineering.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

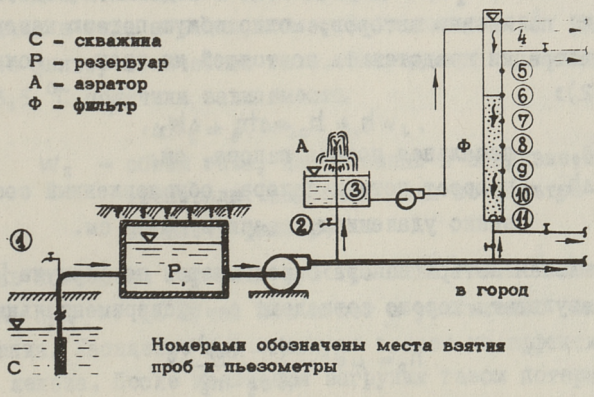
С Е Р И Я А № 309 1971

УДК 628.16.067.1:628.162.1

А.Я. Кыйв, Л.А. Куйк, Э.Р. Каар

# УДАЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД УПРОЩЕННОЙ АЭРАЦИЕЙ И ФИЛЬТРОВАНИЕМ

Водоснабжение города Раквере основано на применении подземных вод кембро-ордовикского водоносного горизонта и кембро-вендского водоносного комплекса. Вода не соответствует стандарту (ГОСТ 2874-54. Вода питьевая) только из-за повышенного содержания железа в двухвалентной форме (0,15 ... 2,85 мг/л). Так как концентрация железа невелика, то исследовалась возможность его удаления путем применения метода упрощенной аэрации и фильтрованием.




Фиг. 1. Схема опытной установки

В состав опытной установки (фиг. I) входили 4 типа аэраторов (каскад, перелив, душ и эжектор), лабораторный насос, фильтр

и автоматика для поддерживания постоянной скорости фильтрования.

Опытный фильтр был из оргстекла, площадью 225 $см^2$. Через каждые 40 см по высоте располагались пьезометры и пробоотборные краны. В качестве загрузки применяли более однородный кварцевый песок 0,7...2,0 мм (эквивалентный диаметр $d_э$ = I,23 мм, коэффициент неоднородности $K = d_{80}/d_{10}$ = = I,8; пористость $m_0$ = 4I %). Предполагаемая максимальная высота загрузки $x$ = 200 см. Фильтрование производилось при скоростях $v$ = 8...I3 м/час.

В процессе аэрирования в воду поступало 3...5 мг/л кислорода. Для окисления 2 мг двухвалентного железа в трехвалентное практически расходовалось I мг $O_2$.

В фильтрате таким образом оставалось 2...3 мг/л $O_2$.

Уже при первых опытах выяснилось, что в загрузке фильтра происходит активное накопление воздуха и вследствие этого прирост потерь напора, который во много раз выше по сравнению с приростом потерь напора за счет накопления железа.

Так как концентрация $O_2$ (кроме расходов на окисление железа) в загрузке не изменялась, то, вероятно, происходила адсорбция газа ($N_2$), содержащегося в подземной воде.

Итак, по мнению авторов, можно общую потерю напора $h$ (см) при фильтрации представить состоящей из трех компонентов (фиг. 2):

$$h = h_0 + \Delta h_в + \Delta h_г, \qquad (I)$$

где $h_0$ – начальная потеря напора, см;

$\Delta h_в$ и $\Delta h_г$ – прирост потери напора, обусловленный соответственно удалением взвеси и газа, см.

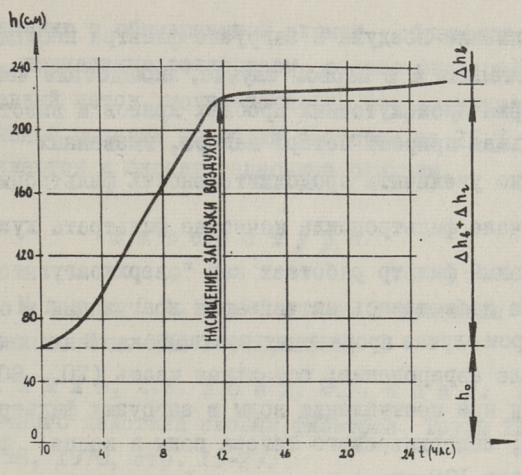
Начальная потеря напора определяется по формуле [I], при этом результаты хорошо совпадают с экспериментальными данными:

$$h_0 = \mu \alpha^2 \frac{v(1-m_0)^2}{1{,}9\, d_э^2 \cdot m_0^3} \cdot x, \qquad (2)$$

где $\mu$ – вязкость воды;

$\alpha$ – коэффициент формы зерен загрузки.

Зависимость $\Delta h_в$ от характера суспензии и загрузки (при их постоянстве – от количества задержанной взвеси) требует изучения, исключая влияние $\Delta h_г$.




**Фиг. 2. Потери напора в фильтре**

Через прозрачные стенки опытного фильтра хорошо было видно, что поры, заполненные газом, отличаются от пор, заполненных водой. Визуально можно было также наблюдать за постоянно опускающейся границей насыщения газом загрузки высотой $x_2$ (см). Скорость сдвига этой границы зависела от скорости фильтрования и вида аэрации, то есть от количества проходящего через фильтр количества газа. В пределах температуры 12,0...13,5 °С получили зависимость

$$\Delta h_2 = 0{,}7 x_2 = 3{,}3 W_2, \qquad (3)$$

где $W_2$ – объем газа, накопленный в загрузке, $см^3/см^2$ (измеряли, выпуская воды из фильтра или промывая фильтр).

Степень насыщения порового пространства газом достигала 70...75 %. При $v > 10$ м/час это ведет к уменьшению скорости фильтрования. Насыщение пор газом не влияет на эффективность удаления железа. После насыщения загрузки газом потеря напора возрастает только за счет накопления железа (фиг. 2).

При фильтровании коагулированной суспензии [2;3] (случай I) и аэрированных железо- и азотсодержащих подземных вод (случай II) можно было заметить общий вид кинетики протекания процессов и сделать вывод об одинаковом их механизме, в основном адсорбционного характера, а именно:

– накопление воздуха в загрузке фильтра наблюдалось в некоторой степени и в первом случае, вследствие чего происходила закупорка промежуточных пробных кранов и вместо воды шел газ; уменьшая прирост потерь напора, вызванных адсорбцией газа, можно увеличить продолжительность фильтроцикла;

– в начале фильтроцикла качество фильтрата хуже;

– песчаный фильтр работает как "сверхкоагулятор". В первом случае наблюдалась активизация коагуляции в слое загрузки. Во втором случае происходит частное окисление железа (20... 30 %) после аэрирования; остальная часть (70...80 %) активно окисляется при поступлении воды в загрузку фильтра. Высота активного, задерживаемого железа зоны в конце фильтроцикла не превышала 120 см;

– в I случае иногда для активизации процесса фильтрации производится манганизирование песка; во втором случае наблюдалось возникновение вокруг зерен загрузки катализирующей марганцовой пленки. Сравнив новый и отработанный песок легко убедиться в том, что отработанный песок обладает наибольшей способностью удаления железа. Содержание мангана в воде составляло 20...35 мкг/л. При отсутствии мангана в фильтруемой воде при удалении железа целесообразно искусственное манганизирование загрузки;

– вид функции $C/C_0 = f(x,t)$ одинаков (Со и С – исходная и конечная концентрация суспензии).

В результате произведенных опытов по удалению железа путем упрощенной аэрации и фильтрования можно (при $C_0$ = I ... 2 мг/л $Fe^{2+}$) рекомендовать следующие параметры процесса:

I) аэрация – каскадом, переливом (при использовании напорных фильтров – эжектором); концентрация $O_2$ после аэрирования – 3...5 мг/л, содержание $N_2$ – минимальное;

2) фильтрование – через более однородный кварцевый песок d = 0,7 ... 2,0 мм, x = 120 ... 200 см, v = 8 ... 10 м/час.

Продолжительность фильтроцикла более недели, содержание железа в фильтрате C < 0,1 мл/л. Необходимая интенсивность промывки – 15 л/сек $м^2$ в течение 5 ... 6 минут.

По сравнению с общепринятой схемой обезжелезование (градирни, контактные резервуары, скорые фильтры), применяя упрощенный метод, можно понизить строительные расходы фильтровальной станции по общим расчетам на 25 %. Кроме того, понижаются и эксплуатационные расходы.

## Литература


I. Д.М. Минц, С.А. Шуберт. Гидравлика зернистых материалов. Изд. МКХ РСФСР, 1955.

2. А.Я. Кыйв, Х.Я. Лонд, Э.Р. Каар. Исследование защитного действия скорых фильтров. Труды ТПИ, серия А, № 298, 1970, стр. 19-29.

3. А.Я. Кыйв, Э.Р. Каар, О.Х. Кяспер. Исследование одноступенчатой очистки воды оз. Юлемисте. Труды ТПИ, серия А, № 298, 1970, стр. 89-95.



A.Kôiv, L.Kuik, E.Kaar


Iron Removal from Underground Waters by Simplified Aeration and Filtratsion


Summary

Some common features of two kinds of filtration are presented - in iron removal from preaerated underground waters and in removal of suspended solids from coagulated waters. A formula for determining head losses in the filter bed is presented consisting of three components - of initial head losses and head losses caused by the removal of suspended particles and by the adsorbtion of gases in the filter pores.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 628.394

Х.Х. Лыхмуссаар

# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ

Вопрос турбулентного переноса в море является одной из важнейших проблем геофизики.

При исследовании турбулентности в море используются разные математические модели, характеризующие процесс диффузии с разной степенью точности. Ввиду исключительной сложности проблемы турбулентного переноса в море, характерно, что теории, исследующие более точно внутреннюю сущность явления, часто не дают рекомендаций по решению практических, инженерно-технических задач.

В таких случаях приходится пользоваться упрощенной моделью, при которой сделаны некоторые допущения о характере процесса.

По нашему мнению, целесообразно использовать полуэмпирическую теорию турбулентной диффузии, позволяющую решать многие задачи прикладного характера.

Предположим, что интересующие нас периоды распространения примеси больше лагранжевого масштаба времени. В этом случае процесс диффузии описывается полуэмпирическим уравнением диффузии в виде

$$\frac{\partial S}{\partial t_1} + u\frac{\partial S}{\partial x_1} = \frac{\partial}{\partial x_1}\left(K_{x_1}\frac{\partial S}{\partial x_1}\right) + \frac{\partial}{\partial y_1}\left(K_{y_1}\frac{\partial S}{\partial y_1}\right) + \frac{\partial}{\partial z_1}\left(K_{z_1}\frac{\partial S}{\partial z_1}\right), \qquad (I)$$

где $S$ – концентрация показателя загрязнения;

$x_1, y_1, z_1$ – направления координатных осей;

$u$ – проекция скорости течения водотока на ось $x_1$;

$K_{x_1}$, $K_{y_1}$, $K_{z_1}$ – коэффициент турбулентной диффузии.

Заменив переменные на $x = x_1 - ut$, $t = t_1$, $y = y_1$, $z = z_1$, получим

$$\frac{\partial}{\partial t_1} = \frac{\partial}{\partial t} - u\frac{\partial}{\partial x_1}; \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x_1}; \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y_1}; \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z_1} \qquad (2)$$

и уравнение (I) приводится к уравнению диффузии в стоячей воде [2]

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial S}{\partial z}\right). \qquad (3)$$

Решение (I) получается из решения уравнения (3) путем замены $x$ на $x_1 - ut$.

При расположении мгновенного точечного источника примеси производительностью $G_0$ в точке $P(0, 0, z_0)$ начальным условием является

$$S(x, y, z, 0) = G_0 \delta(x)\, \delta(y)\, \delta(z - z_0). \qquad (4)$$

При расчетах распространения примеси в море граничными условиями являются

$$\lim_{x \to \infty} S(x, y, z, t) = \lim_{x \to -\infty} S(x, y, z, t) = 0; \qquad (5)$$

$$\lim_{y \to \infty} S(x, y, z, t) = \lim_{y \to -\infty} S(x, y, z, t) = 0; \qquad (6)$$

$$K_z \frac{\partial S}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0;$$

$$K_z \frac{\partial S}{\partial z}\Big|_{z=H} + \beta S = 0, \qquad (7)$$

где $\beta$ – постоянная, учитывающая поглощающие способности на дне моря;

$H$ – глубина моря.

Коэффициенты турбулентности считаем функцией координат

$$K_x = K(x), \quad K_y = K(y), \quad K_z = K(z).$$

Если представить начальные условия в виде умножения

$$f(x_1, y, z, 0) = f_1(x_1)\, f_2(y)\, f_3(z),$$

то решение уравнения (I) можно написать в виде произведения решений одноразмерных задач [3].

$$S_M(x,y,z,t) = \frac{1}{G_0^2} S_1(x_1,t)\, S_2(y,t)\, S_3(z,t), \qquad (8)$$

где $S_1(x_1,t)$ решение задачи

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x_1} = \frac{\partial}{\partial x_1}\left(K(x_1)\frac{\partial S}{\partial x_1}\right), \qquad (9)$$

$S_2(y,t)$ решение задачи

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(K(y)\frac{\partial S}{\partial y}\right), \qquad (10)$$

$S_3(z,t)$ решение задачи

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K(z)\frac{\partial S}{\partial z}\right). \qquad (11)$$

Соответственно при начальных условиях

$$S_1(x_1,0) = G_0\delta(x_1) \qquad (12)$$

$$S_2(y,0) = G_0\delta(y) \qquad (13)$$

$$S_3(z,0) = G_0\delta(z-z_0) \qquad (14)$$

и граничных условиях (5), (6) и (7).

Решение одномерных нестационарных задач (9), (10), (11) состоит в нахождении соответствующей функции Грина. Задачи горизонтальной турбулентности (9) и (10) достаточно исследованы. Более трудно решать задачу вертикальной турбулентной диффузии в зависимости от сильной статификации моря.

Теоретические исследования идут в двух направлениях. Во-первых, можно использовать различные методы интегральных преобразований, с помощью которых уравнение (11) преобразуется в обыкновенное линейное дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами. Этими методами можно решать ряд частных задач при фиксированном аналитическом виде коэффициента турбулентности $K(z)$. Но во многих случаях мы встречаемся с большими трудностями, так как дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами недостаточно разработаны и часто не существует оригинала для решения характеристического уравнения.

Во-вторых, можно пользоваться вариационными методами. При этом получается функция, которая с какой-то точностью ап-

проксимирует точное решение уравнения (II). Полученные вариационными методами результаты не характеризуют внутренней закономерности турбулентного переноса, но они успешно могут быть использованы в инженерной практике для всех общих видов коэффициента $K_z$, характерных для вертикального переноса в условиях моря.

Рассмотрим подробнее некоторые аспекты использования вариационных методов.

Найдем сначала частное решение уравнения (II) вида

$$S(z,t) = y(z)\,m(t). \qquad (I5)$$

Подставляя (I5) в (II), можем заменить уравнение (II) системой

$$\left.\begin{aligned} m' + \lambda m &= 0 \\ (Ky')' + \lambda m &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (I6)$$

где $\lambda$ – неопределенная постоянная.

Решением первого уравнения системы (I6) является

$$m(t) = Ce^{-\lambda t}, \qquad (I7)$$

где $C$ имеет любые значения.

Второе уравнение представляет собой задачу Штурма–Лиувилля о собственных функциях, если $K(z)$ имеет непрерывную производную и выполнено условие

$$\int_0^H \frac{dz}{K(z)} < +\infty. \qquad (I8)$$

Краевые условия (7) определяются граничными условиями для функции $y(z)$. Они удовлетворяют краевым условиям задачи Штурма–Лиувилля.

Обозначив собственные значения задачи Штурма–Лиувилля в порядке увеличения $\lambda_1 < \lambda_2 < \ldots < \lambda_n < \ldots$, можем частные решения уравнения

$$(Ky')' + \lambda y = 0$$

представить в виде

$$S_k(z,t) = C_k e^{-\lambda_k t} y_k(z)$$

$$k = 1, 2, \ldots \infty, \qquad (I9)$$

где $C_к$ – неопределенные числа;

$y_к(z)$ – нормированная собственная функция, соответствующая собственным числам $\lambda_к$.

Общим решением будет ряд

$$S(z,t) = \sum_{к=1}^{\infty} C_к e^{-\lambda_к t} y_к(z). \qquad (20)$$

Решение (20) удовлетворяет краевым условиям. Выберем постоянные $C_к$ так, чтобы выполнялось и начальное условие (I4).

При $t = 0$ получим

$$f_3(z) = \sum_{к=1}^{\infty} C_к y_к(z), \qquad (2I)$$

где $S(z,0) = f_3(z)$ – начальное распределение концентрации.

Если $f_3(z)$ удовлетворяет обычным требованиям разложения ряда Фурье по ортонормированным функциям, получим

$$C_к = \int_0^H f_3(z)\, y_к(z)\, dz \qquad к = 1, 2, \ldots \infty. \qquad (22)$$

Подставляя значения $C_к$ в формулу (20), придадим ей вид

$$S_3(x,t) = \sum_{к=1}^{\infty} e^{-\lambda_к t}\, y_к(z) \int_0^H f_3(z)\, y_к(z)\, dz. \qquad (23)$$

Учитывая, что в данном случае $f_3(z) = G_0 \delta(z - z_0)$

и $\int_0^H \delta(z - z_0)\, y_к(z)\, dz = y_к(z_0), \qquad к = 1, 2, \ldots \infty,$

получаем общее решение уравнения (II), удовлетворяющее начальному условию (I4) и краевым условиям (7)

$$S(z,t) = G_0 \sum_{к=1}^{\infty} e^{-\lambda_к t}\, y_к(z)\, y_к(z_0), \qquad (24)$$

где $y_к(z)$ и $\lambda_к$ – соответственно собственные функции и собственные числа задачи Штурма–Лиувилля.

Задачу Штурма Лиувилля можно решать в общем случае только

приблизительно. Можно использовать вариационные методы, так как оператор $L$ в (25) при условии (I8) и (7) будет положительным

$$Ly = -\frac{d}{dz}\left[K(z)\frac{dy}{dz}\right]. \qquad (25)$$

Сущность вариационного метода заключается в том, что решение операторного уравнения

$$Ly = f(z) \qquad (26)$$

является экстремирующей функцией функционала

$$F[y] = \int_0^H -\frac{d}{dz}\left[K(z)\frac{dy}{dz}\right]\cdot y(z)\,dz - 2\int_0^H f(z)y(z)\,dz, \qquad (27)$$

где $f(z)$ – правая часть уравнения (26).

Проблема экстремума решается приближенно на основе линейнонезависимой системы координатных фцнкций $\varphi_1(z), \varphi_2(z), \ldots \varphi_n(z)$ методом вариации постоянных $d_{ik}$, $i=1,2,\ldots n$. Собственная функция $y_k(z)$ представляется приблизительно в виде $\bar{y}_k$ по формуле

$$\bar{y}_k = \sum_{i=1}^{n} d_{ik}\varphi_i(z). \qquad (28)$$

Вариационные коэффициенты $d_{ik}$ $i=1,2,\ldots n$ можно вычислить по методу Ритца. Они являются компонентами собственного вектора матрицы (29)

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, \ldots\ldots a_{1n} \\ a_{21}, a_{22}, \ldots\ldots a_{2n} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ a_{n1}, a_{n2}, \ldots\ldots a_{nn} \end{pmatrix} \qquad (29)$$

с элементами

$$a_{ik} = \int_0^H L\varphi_i\varphi_k\,dz.$$

Собственные векторы матрицы являются нетривиальными решениями алгебраической системы

$$A\vec{d}_k = \lambda_k\vec{d}_k. \qquad (30)$$

Собственные значения $\lambda_k$ матрицы (29) являются корнями алгебраического уравнения степени $n$

$$|A-\lambda E| = 0. \qquad (3I)$$

Собственные векторы $\bar{d}_k = \{d_{1k}, d_{2k}, \dots d_{nk}\}$ получим, подставляя $\bar{\lambda}_k$ в систему (30) и решая ее. Из математической теории вариационных методов известно, что собственные числа матрицы (29) приблизительно равны собственным числам задачи Штурма-Лиувилля

$$\lambda_k \approx \bar{\lambda}_k \qquad k = 1, 2, \dots n$$
$$y_k \approx \bar{y}_k = \sum_{i=1}^{n} d_{ik} \varphi_i(z). \tag{32}$$

Подставив полученные результаты в (24), получим выражение, аппроксимирующее решение уравнения (II) при начальном условии (2) и краевых условиях (7)

$$S(z,t) = G_0 \sum_{k=1}^{n} e^{-\bar{\lambda}_k t} \sum_{i=1}^{n} d_{ik} \varphi(z) \sum_{i=1}^{n} d_{ik} \varphi_i(z_0). \tag{33}$$

При увеличении числа координатных функций точность аппроксимации в общем увеличивается. Использование формулы (33) зависит от конкретной формы системы координатных функций, удовлетворяющих ураевые условия (7).

При этом целесообразно определить их на основе решения дифференциальных уравнений (34)

$$\frac{d\bar{\varphi}}{dz} + \beta \bar{\varphi}_k(z) = \sin \frac{k\pi z}{H} \qquad k = 1, 2, \dots n. \tag{34}$$

Решениями являются

$$\bar{\varphi}_k(z) = \frac{1}{\beta^2 + \frac{k^2\pi^2}{H^2}} \left[ \beta \sin \frac{k\pi}{H} z - \frac{k\pi}{H} \cos \frac{k\pi}{H} z \right]. \tag{35}$$

Они образуют линейную независимую ортогональную систему как тригонометрические полиномы. Как видим, краевые условия удовлетворяют и функции, полученной от $\bar{\varphi}_k(z)$ умножением некоторых постоянных. Этот факт позволяет ортонормировать систему координатных функций. Соответствующая ортонормированная система записывается в виде

$$\varphi_k(z) = \sqrt{\frac{2H^2}{\beta^2 H^2 + k^2\pi^2}} \left[ \beta \sin \frac{k\pi}{H} z - \frac{k\pi}{H} \cos \frac{k\pi}{H} z \right]. \tag{36}$$

Элементы матрицы системы (28) вычисляются по формуле

$$a_{ik} = \int_0^H - \frac{d}{dz}\left[K(z)\varphi_i'(z)\right]\varphi_k(z)\,dz$$

$$a_{ik} = -K(z)\varphi_i'\varphi_k\Big|_0^H + \int_0^H K(z)\varphi_i'(z)\varphi_k'(z)\,dz. \qquad (37)$$

Подставляя $\varphi_k(z)$ из (36) в (37), получим

$$a_{ik} = \frac{2H^2}{\sqrt{\beta^2H^2+i^2\pi^2}\sqrt{\beta^2H^2+k^2\pi^2}}\,b_{ik}, \qquad (38)$$

где

$$b_{ik} = \frac{\pi^2\beta}{H^2}\left[ik(-1)^{i+k+1} - K(0)\right] + \frac{\pi^2\beta}{H}ik\int_0^H K(z)\cos\frac{i\pi}{H}z\cos\frac{k\pi}{H}z\,dz +$$

$$+ \frac{\pi^4}{H^4}i^2k^2\int_0^H K(z)\sin\frac{i\pi}{H}z\sin\frac{k\pi}{H}z\,dz + \frac{\pi^3}{H^3}\beta ik\left[i\int_0^H K(z)\sin\frac{k\pi}{H}z\cdot\right.$$

$$\left.\cdot z\cos\frac{i\pi}{H}z\,dz + K\int_0^H K(z)\sin\frac{i\pi}{H}z\cos\frac{k\pi}{H}z\,dz\right].$$

Как видно, $a_{ik} = a_{ki}$, и полученная матрица симметрична. Все собственные числа $\bar{\lambda}_k$ действительные. Симметричность матрицы упрощает значительно процесс вычисления $\bar{\lambda}_k$ и $\bar{d}_k$. В случае постоянных горизонтальных коэффициентов $K_x = \text{const}$, $K_y = \text{const}$ решениями уравнений (9) и (10) при начальных условиях (12) и (13) и краевых условиях (5) и (6) являются соответственно [3]

$$S_1(x_1,t) = \frac{G_0}{2\pi\sqrt{\pi K_x t}}\exp\left[-\left(\frac{x-ut}{2\sqrt{K_x t}}\right)^2\right] \qquad (39)$$

$$S_2(y,t) = \frac{G_0}{2\pi\sqrt{\pi K_y t}}\exp\left[-\left(\frac{x-ut}{2\sqrt{K_x t}}\right)^2\right]. \qquad (40)$$

Решение уравнения (1), удовлетворяющее начальному условию (4) и краевым условиям (5), (6), (7), записывается по формуле (8)

$$S_M(x_1,y,z,t) = \frac{G_0^3}{4\pi\sqrt{K_x K_y t}}\exp\left[-\left(\frac{x_1-ut}{2\sqrt{K_x t}}\right)^2\right]\cdot$$

$$\cdot\exp\left[-\left(\frac{y}{2\sqrt{K_y t}}\right)^2\right]\sum_{k=1}^{n} e^{-\bar{\lambda}_k t}\,\psi_k(z)\psi_k(z_0), \qquad (41)$$

где

$$\psi_k(z)=\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\frac{2H^2}{\beta^2H^2+i^2\pi^2}}\,d_{ik}\left[\beta\sin\frac{i\pi}{H}z-\frac{i\pi}{H}\cos\frac{i\pi}{H}z\right]. \qquad (42)$$

Распределение концентрации от непрерывно действующего точечного источника мощностью $G(t)$ определяется принципом суперпозиции, суммируя решения для точечного мгновенного источника по времени. Результатом будет формула

$$S(x_1,y,z,t)=\int\frac{G(t-t')}{4K_xK_y(t-t')}\exp\left[-\left(\frac{x_1-u(t-t')}{2\sqrt{K_x(t-t')}}\right)^2\right]\times$$

$$\times\exp\left[-\left(\frac{y}{2\sqrt{K_y(t-t')}}\right)^2\right]\sum_{k=1}^{n}e^{-\bar{\lambda}_k(t-t')}\psi_k(z)\psi_k(z_0)\,dt' \qquad (43)$$

или

$$S(x_1,y,z,t)=\sum_{k=1}^{n}\psi_k(z)\psi_k(z_0)\int_0^t\frac{G(t-t')}{4K_xK_y(t-t')}\exp\left[-\left(\frac{x_1-u(t-t')}{2\sqrt{K_x(t-t')}}\right)^2\right]\times$$

$$\times\exp\left[-\left(\frac{y}{2\sqrt{K_yt}}\right)^2\exp\left[-\bar{\lambda}_k(t-t')\right]\right]dt', \qquad (44)$$

где $\psi_k(z)$ – определяются по формуле (42).

Целесообразно выразить $K_z$ и $G(t)$ как полиномы

$$K(z)=\sum_{k=1}^{m}a_kz^k \qquad (45)$$

и

$$G(t)=\sum_{k=1}^{r}b_kt^k, \qquad (46)$$

а если $G(t)$ точечный источник периодичный, то через тригонометрический полином

$$G(t) = \sum_{k=1}^{n} a_k \cos kt + b_k \sin kt. \qquad (47)$$

При использовании формулы (44) придется вычислить собственные значения $\bar{\lambda}_k$ и собственные векторы $\bar{d}_k$ матрицы (29). Элементы матрицы определяются по формуле (38). Целесообразно использовать электронно-вычислительную технику.

## Литература


1. А.С. Монин. Полуэмпирическая теория турбулентной диффузии. Труды Географического института АН СССР, № 33(160), М., 1956.

2. Р.В. Озмидов. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. Изд. "Наука", М., 1968.

3. А.М. Айтсам. Турбулентная диффузия веществ загрязнения, сбрасываемых сточными водами в море. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, М., 1968.

4. R. Courant, D. Hilbert. Methods of Mathematical Physics, vol. II, New-York, London, 1962.



H. Lõhmussaar


Some Aspects of the Analytical Solution of the Semiempirical Diffusion Equation


### Summary

This paper deals with some aspects of solving the equation of vertical diffusion in cases of stratified environment.

The solution is possible by substituting the Stumm-Liouwille eigenvalue equation, being approximately solved as a method of variations for parabolic differential equation, with depending on the coordinates coefficients.

The problem is previously solved for point source, while the results obtained may be used on the superposition principle for continuous source.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 628.33

Л.Л. Пааль, О.П. Паулус

# ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ ОЧИСТКИ ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Теоретические основы работы микрофильтров при очистке сточных вод были нами проверены лабораторными опытами [3]. Для того, чтобы рекомендовать полученные результаты исследования для проектирования микрофильтров при очистке сточных вод с большими концентрациями взвешенных веществ, была оборудована полупроизводственная установка микрофильтра для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод одного из жилых районов г. Таллина.

В качестве полупроизводственной установки применялся микрофильтр типа АКХ с размерами барабана $l$ = 50 см и D = 50 см. Опыты проводились с микросетками 4-х марок, т.е. 01, 008, 0063 и 004, при скоростях вращения барабана 4,72, 6,28 и 9,42 м/мин, которым соответствуют продолжительности рабочих циклов микрофильтра 12, 9 и 6 секунд.

Чтобы захватить все диапазоны колебания концентраций ингредиентов загрязнения и искусственно не увеличить степень концентрации взвешенных веществ в исходной сточной воде, опыты проводились циклами с продолжительностью в одни сутки.

В результате исследования были получены данные о производительности микрофильтра, потери напора в микросетке, расходе промывной воды, а также результаты химических анализов исходной и профильтрованной воды. Производительность микрофильтра определялась при помощи треугольного мерного водослива, а расход промывной воды измерялся по объемному методу.

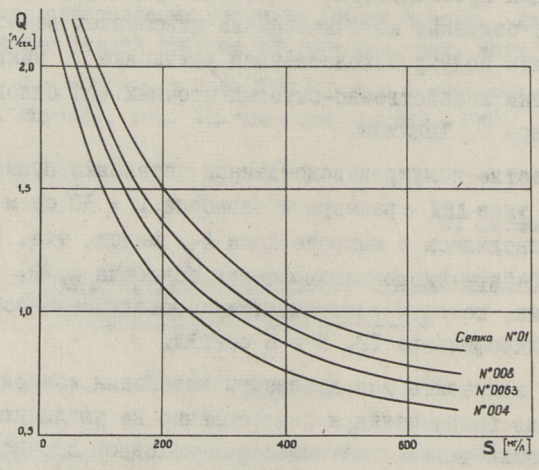
Производительность микрофильтра, как один из основных показателей его работы, нами определена в виде функции

$$Q = f(\xi) = f(S_н), \qquad (I)$$

где $S_н$ – начальная концентрация взвешенных веществ сточной воды, мг-л;

$\xi$ – суммарный коэффициент сопротивления микросетки.

Как показывают результаты исследования, производительность микрофильтра колеблется в пределах от 0,56 до 2,2 л/сек, соответственно удельная производительность – от I3,2 до 52,0 $м^3/м^2$ час. На фиг. I показана зависимость производительности микрофильтра от начальной концентрации взвешенных веществ




**Фиг. 1. Зависимость производительности микрофильтра от начальной концентрации взвешенных веществ**

Из фиг. I видно, что для данной марки микросетки производительность зависит только от начальной концентрации взвешенных веществ, т.е. только от сопротивления микрофильтра. Следует отметить, что при минимальном расходе, т.е. при 0,56 л/сек, концентрация взвешенных веществ исходной воды была I040 мг/л и использовалась микросетка марки 004.

При более высоких концентрациях взвешенных веществ производительность $Q$, разумеется, еще уменьшится, но такие явления при хозяйственно-бытовых сточных водах являются исключением.

По нашему мнению, производительность микрофильтра, а следовательно, и сопротивление микросетки, зависит от состава, гидравлической крупности взвешенных веществ. Иными словами, производительность микрофильтра зависит от характера источника сточных вод. Так как большинство авторов [I, 2, 4, 6 и др.] при очистке сточных вод применяли микрофильтры после биологической очистки, то состав исходной воды у них был равным и поэтому эти результаты сравнивать нельзя.

Для сравнения опытных данных с расчетными была использована формула

$$Q = \frac{\omega}{\sqrt{\xi}} \sqrt{2g\Delta H}, \qquad (2)$$

где $\omega$ – живое сечение микросетки, $м^2$;

$\Delta H$ – потеря напора, м.

При такой проверке суммарный коэффициент сопротивления микросетки был определен из зависимости $\xi = f(S_н)$, которая нами приведена в работе [3].

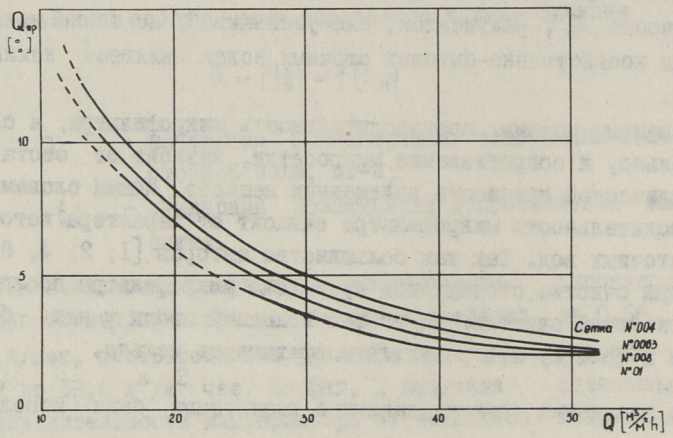
Расхождение между опытными данными и рассчитанными по формуле (2) получилось до I0 %, что можно считать вполне приемлемым.

Расход промывной воды определялся в виде функции

$$Q_{пр} = f(\xi) = f(S_н) = f(Q). \qquad (3)$$

В условиях наших опытов расход промывной воды колебался в пределах от 2 до I2 % от производительности микрофильтра.

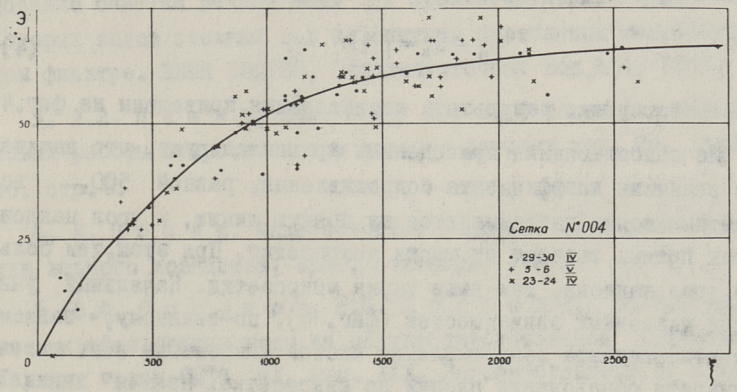
Как видно из фиг. 2, при больших производительностях микрофильтра, т.е. при малых начальных концентрациях взвешанных веществ, марка микросетки на расход промывной воды существенно не влияет, но при более высоких начальных концентрациях взвешенных веществ это влияние становится очевидным.



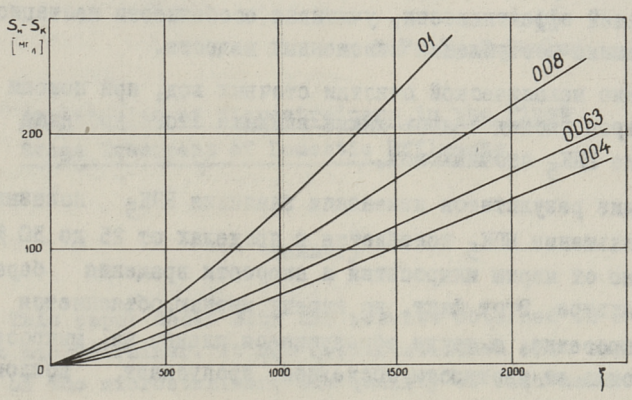

**Фиг. 2. Зависимость расхода провывной воды от производительности микрофильтра**

Анализ результатов исследования на полупроизводственной установке по эффекту очистки сточных вод по взвешенным веществам позволяет сделать ряд интересных выводов, которые в свою очередь являются полезными для проектирования микрофильтров. Так, например, изменение линейной скорости вращения барабана микрофильтра от 7,87 до 15,7 см/сек при определенной микросетке не влияет на степень и эффект очистки по взвешенным веществам, и поэтому все опытные точки можно поместить на один график.

Из приведенной закономерности (фиг. 3) выясняется, что при увеличении коэффициента суммарного сопротивления микросетки увеличивается и эффект очистки. При этом интересно отметить, что независимо от марки микросетки максимальный эффект очистки по взвешенным веществам не превышает 65 %. По нашему мнению, физическая сущность данного явления объясняется тем, что плотность образующейся на микросетке пленки не зависит от марки микросетки. От плотности пленки зависит коэффициент сопротивления, и поэтому при одном и том же его значении для всех марок микросеток будет одинаковый эффект очистки.




**Фиг. 3. Зависимость эффекта очистки сточных вод по взвешенным веществам от коэффициента сопротивления, микросетка 004**




**Фиг. 4. Сводный график снижения концентрации взвешенных веществ от коэффициента сопротивления**

Правильный выбор марки микросетки зависит от требуемого снижения концентрации взвешенных веществ. Таким образом, очень важным фактором при проектировании микрофильтров является определение разницы снижения концентрации взвешенных

веществ, которая находится в виде функции

$$S_н - S_к = f(\xi). \qquad (4)$$

Соответствующие результаты исследования приведены на фиг.4.

Из сопоставления приведенных кривых следует, что начиная от величины коэффициента сопротивления, равной 500, все опытные точки накладываются на прямую линию, и угол наклона этих прямых зависит от марки микросетки. При этом, чем больше угол наклона, тем выше марка микросетки. Начальный участок указанных зависимостей (фиг. 4), по-видимому, зависит от коэффициента сопротивления чистой микросетки и от интенсивности образования пленки на микросетке. Прямая линия в свою очередь характеризует, по нашему мнению, уже процесс микрофильтрации в условиях образовавшейся пленки.

Кроме того, сопоставление кривых (фиг. 4) позволяет сравнить степень очистки по взвешенным веществам при использовании разных марок микросеток и сделать вывод об их наибольшей эффективности, учитывая особенности нестационарного режима поступления взвешенных веществ.

Помимо механической очистки сточных вод, при помощи микрофильтров исследовалось также влияние этого процесса на снижение $БПК_5$ сточных вод.

Анализ результатов изменения значения $БПК_5$ показывает, что уменьшение $БПК_5$ колеблется в пределах от 25 до 30 % независимо от марки микросетки и скорости вращения барабана микрофильтра. Этот факт, по нашему мнению, объясняется тем, что микросетка, а также образующаяся пленка на микросетке, независимо от плотности последней, пропускает коллоидные частицы и растворенную органику.

## Литература

I. Я. Крейчик. Напорная фильтрация грубых суспензий. УП отраслевые дни водного хозяйства, Брно, сентябрь, 1969.

2. И.К. Лавриненко, П.А. Соляник. Исследование очистки речной воды для производственных нужд и некоторых видов сточных вод на опытном барабанном микросетчатом фильтре. ВНИИ ВОДГЕО, Очистка сточных вод,№ 4, 1969.

3. Л.Л. Пааль, О.П. Паулус. О теоретических основах работы микросеток при очистке сточных вод. См. наст. сб. стр.3.

4. И. Полак. Микросетчатые фильтры. УП отраслевые дни водного хозяйства, Брно, сентябрь, 1969.

5. В.Ф. Соколов, М.И. Прахова. Исследования по микрофильтрации воды на полупроизводственной установке. Научные труды ОНТИ АКХ, вып. XXX. Водоснабжение,№ 4, 1964.

6. Л.Л. Шляпников. Применение микрофильтров для очистки сточных вод. Водоотведение и очистка вод. Минск, 1969.

L.Paal, O.Paulus

## Application of Microstrainers in the First Stage Treatment of Domestic Effluents

Summary

This paper deals with the results obtained on a pilot plant microstrainer. It has been established that the capacity of the microstrainer, the quality of wash-water and the purification effect depend upon the resistance coefficient.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
С Е Р И Я А № 309 1971

УДК 628.35:532.501.11

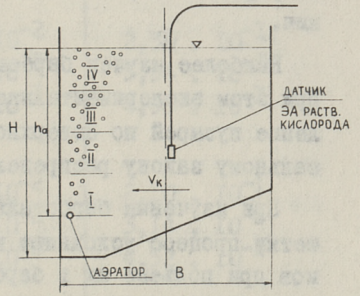
Х.А. Мёльдер, А.Л. Острат, Л.Л. Пааль

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ НА МОДЕЛЯХ АЭРИРУЕМЫХ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Канализационные очистные сооружения являются в сущности сложными многофазными системами.

Изучение основных характеристик таких систем представляет значительную методическую и экспериментальную трудность, и поэтому результаты исследований разных авторов часто противоречивы. Необходимость более глубокого изучения гидродинамики и вопросов массопередачи в очистных сооружениях вызвана также отсутствием общих законов моделирования многофазных систем.

Целью нашей работы являлось лабораторное исследование гидродинамики и основных характеристик массопередачи в разномасштабных, геометрически подобных моделях двухфазных (вода-воздух) барботажных систем.




Фиг. 1. Разрез лабораторной модели аэрируемой системы.

Лабораторная опытная установка состояла из двух моделей аэрируемых систем (фиг. 1).

Малая модель имела размеры поперечного сечения B = H = = 0,5 м; длина L = 0,3 м. Большая соответственно B = H = = 1,0 м; L = 0,3 м.

Такие модели называются в литературе разрезными моделями [7].

В качестве аэратора использовалась дырчатая труба (отверстия d = 2,5 и I,0 мм) и пористый металлокерамический аэратор (размеры пор I50 $\mu$ ), который устанавливался на глубине $h_a$ = 0,8 H с отверстиями вниз и вверх. Интенсивность аэрации J изменялась в пределах от 3 до I3 $м^3/м^2 \cdot час$.

В описанных барботажных системах при аэрации сжатым воздухом водопроводной воды определялись размеры пузырьков воздуха, площадь поверхности контакта фаз, скорость всплывания пузырьков, циркуляционные скорости потока водо-воздушной смеси и скорость растворения кислорода.

Ниже изложены основные результаты экспериментального исследования.

Одним из факторов, влияющих на эффективность массопередачи, является величина поверхности контакта фаз, которая зависит от гидродинамических условий процесса. Величину поверхности контакта фаз можно определить оптическими, фотографическими, химическими методами и методом $\gamma$ -излучения.

Наиболее изучен барботаж газа из одиночных отверстий. При этом экспериментально установлено [I0], что распределение пузырей по поверхностям и объемам подчиняется нормальному закону распределения.

При изучении барботажа через трубчатые аэраторы и решетки процесс усложняют коалесценция и дробление пузырьков при подъеме их в барботажном слое и возникновение циркуляционных потоков, вследствие чего в слое одновременно находятся пузырьки разных размеров.

Для определения поверхности контакта фаз нами был использован фотографический метод.

Вначале было изучено распределение пузырьков по диаметрам в отдельных зонах (I-IУ) по высоте (фиг. I) на основе фотографий и найдено, что распределение по диаметрам остается неизменным во времени, если условия аэрации не изменяются.

Далее была определена величина поверхности контакта фаз при интенсивностях аэрации 3,7 и I3 $м^3/м^2$.час в большой и малой модели. Результаты измерений представлены в таблице I.

Таблица I

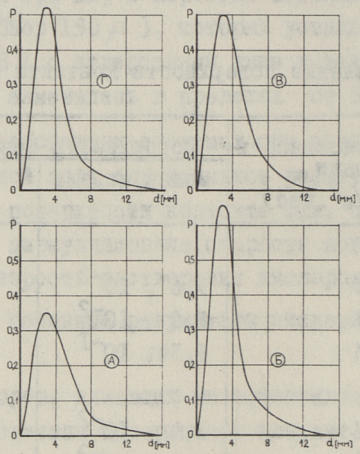
Определение поверхности контакта фаз

| Диаметр отверстий (мм) | Интенсивность аэрации ($м^3/м^2$.час) | Поверхность контакта фаз ($м^2$) | |
|---|---|---|---|
| | | Малая модель | Большая модель |
| 2,5 отв.вверх | 3 | $5,6 \cdot I0^{-2}$ | $I,90 \cdot I0^{-I}$ |
| | 7 | $8,9 \cdot I0^{-2}$ | $3,34 \cdot I0^{-I}$ |
| | I3 | $I,34 \cdot I0^{-I}$ | $5,I3 \cdot I0^{-I}$ |
| 2,5 отв.вниз | 3 | $5,4 \cdot I0^{-2}$ | $I,80 \cdot I0^{-I}$ |
| | 7 | $6,8 \cdot I0^{-2}$ | $2,98 \cdot I0^{-I}$ |
| | I3 | $I,35 \cdot I0^{-I}$ | $4,65 \cdot I0^{-I}$ |
| I,0 отв.вверх | 3 | $5,9 \cdot I0^{-2}$ | $2,30 \cdot I0^{-I}$ |
| | 7 | $8,7 \cdot I0^{-2}$ | $3,34 \cdot I0^{-I}$ |
| | I3 | $I,2I \cdot I0^{-I}$ | $4,95 \cdot I0^{-I}$ |
| I,0 отв.вниз | 3 | $5,7 \cdot I0^{-2}$ | $2,I0 \cdot I0^{-I}$ |
| | 7 | $8,2 \cdot I0^{-2}$ | $3,I4 \cdot I0^{-I}$ |
| | I3 | $I,I9 \cdot I0^{-2}$ | $4,52 \cdot I0^{-I}$ |
| Пористые аэраторы | 3 | $I,28 \cdot I0^{-I}$ | $4,95 \cdot I0^{-I}$ |
| | 7 | $I,62 \cdot I0^{-I}$ | $6,25 \cdot I0^{-I}$ |
| | I3 | $I,80 \cdot I0^{-I}$ | $6,96 \cdot I0^{-I}$ |

Кривые распределения при нашей системе являются асимметричными с положительной косостью. Распределение пузырьков по диаметрам можно охарактеризовать распределением Байенса.

В качестве примера на фиг. 2 изображены кривые распределения пузырьков в малой модели в разных зонах по высоте при

d = 2,5 мм, J = 7 $м^3/м^2 \cdot$час и направлении отверстий аэратора вверх.




Фиг. 2. Кривые распределения пузырьков по диаметрам:
А – I + II четверть, Б – III четверть,
В – IУ четверть, Г – весь кадр

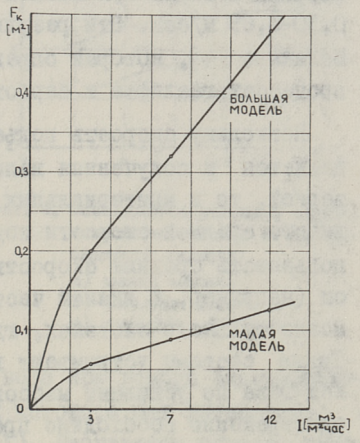
Рамакриснан и Кумар [9] изучили влияние ориентации выходных отверстий на образование пузырей воздуха при подаче его в жидкость из одиночных отверстий. Положение отверстий было изменено с 0 $^0$ (вверх) до 90 $^0$ от вертикали. Результаты их работ свидетельствуют о том, что ориентация отверстия лишь незначительно влияет на размер получаемых пузырей при прочих равных условиях истечения.

Наши опыты показали, что при аэрации через трубчатые аэраторы с многими отверстиями влияние ориентации отверстий также незначительное. Поверхности контакта фаз при ориентации отверстий вверх и вниз при прочих равных условиях аэрации отличаются в среднем на 4–I0 % в зависимости от интенсивности аэрации.

При использовании трубчатых аэраторов из пористого материала поверхности контакта фаз были почти в два раза больше, чем при аэраторах с отверстиями I,0 и 2,5 мм. Это объясняется тем, что число возникающих пузырьков велико и их размеры очень малы в случае пористого аэратора. На фиг. 3 изображено изменение площади контакта фаз (пузырьков) при

разных интенсивностях аэрации в большой и малой модели, при диаметрах аэратора d = I,0...2,5 мм.

В критериальных уравнениях массопередачи часто используют в качестве характерной скорости системы скорость подъема пузырьков. Достаточно хорошо изучены скорости подъема газовых пузырьков из одиночных отверстий. По литературным данным [I,2,3] скорость изолированного пузырька возрастает с увеличением диаметра пузырька до 2-3 мм, после чего в большом диапазоне сохраняется постоянное ее значение, равное 25-30 см/сек. По Левичу [3] скорость пузырьков с диаметрами в интервале 0,2 – I,5 см почти не зависит от диаметра пузырька и составляет 28-30 см/сек. Пузырьки побольше поднимаются с несколько большими скоростями - около 35-40 см/сек.




Фиг. 3. Зависимость площади контакта фаз (пузырьков) от интенсивности аэрации.

В барботажном слое скорость движения пузырьков зависит от влияния соседних пузырьков, т.е. от стесненности барботажного слоя. Поскольку в барботажном слое возникает дробление и коалесценция пузырьков, скорость их движения по высоте не является постоянной. Вследствие этого при стесненном всплывании пузырей речь может идти только о средней скорости для данного участка их подъема.

Вышеизложенное подтверждается распределением пузырьков по диаметрам. Кривые распределения в первой и второй четверти плоские (фиг. 2), так как в этой части довольно много больших пузырьков. Форма этих пузырьков непрерывно изменяется и становится совершенно случайной и неопределенной.

В дальнейшем происходит дробление пузырьклв на отдельные пузыри небольшого диаметра. Это также видно из кривых распределения пузырей по диаметрам.

Нами было исследовано движение пузырей при помощи киносъемки (250 кадров/сек).

В исследованной нами системе возникает циркуляция воды, которая увеличивает скорость подъема газовых пузырей. На отдельных участках движения скорости газовых пузырей диаметрами 2-15 мм при высоте жидкостного слоя 0,4-0,8 м были 0,30-0,65 м/сек. Эти результаты согласуются с результатами Меликяна [4], который определил скорость всплытия газа в процессах газлифта и барботажа.

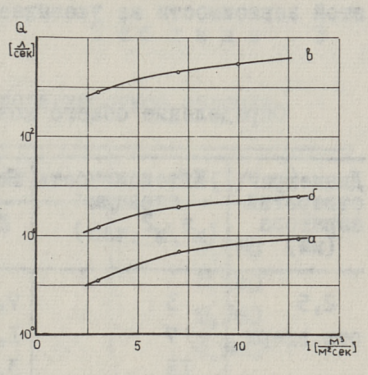
Поскольку скорость подъема пузырьков очень трудно определяется и полученная величина не является вполне достоверной, то в критериальных уравнениях характерной скоростью вместо средней скорости подъема пузырьков предлагается использовать среднюю скорость циркуляции водо-воздушной смеси (например, в нижней части аэрационной системы). Это возможно только в системах, где наблюдается циркуляция воды. Такие системы устраивают в случаях, когда требуемый расход газа по условиям массопередачи должен быть невелик и одновременно необходимо предотвратить оседание взвеси в системе.

Циркуляция обеспечивает перемешивание жидкости и газа и увеличивает время контакта (маленькие пузыри засасываются в неаэрируемую часть аэрационной системы), что в свою очередь несколько повышает эффективность массообменного аппарата.

Механизм циркуляции в аэрационной камере похож на механизм натуральной конвекции, только силы, которые совершают циркуляцию, больше чем при натуральной конвекции.

Скорости циркуляции смеси измерялись гидрометрической микровертушкой в вертикальной плоскости симметрии системы при разных глубинах аэратора, т.е. при $h_a = 0,2...0,8H$ [5]. В результате было установлено, что скорости циркуляции жидкости увеличиваются с увеличением расхода воздуха и глубины погружения аэратора. Диаметр отверстий аэратора практически на гидродинамические условия аэрации не влияет. Если отверстия аэратора направлены вниз, скорости циркуляции были в среднем на 4-5 % больше, чем при расположении отверстий на верхней стороне аэратора.

По циркуляционным скоростям были определены также расходы циркуляционных потоков воды в аэрационных камерах. Дополнительно были проведены измерения скоростей циркуляции и определение расходов циркуляционных потоков на установке биологической очистки БИО-25 [6] при трех интенсивностях аэрации ( 3, 7, 10 $м^3/м^2$.час). Зависимость расходов циркуляционных потоков от интенсивности аэрации показана на фиг. 4.




Фиг. 4. Зависимость расходов циркуляционных потоков от интенсивности аэрации:
а) малая модель
б) большая модель
в) установка БИО-25

Для изучения явления массопередачи в исследуемых моделях измерялась скорость растворения кислорода (массопередача) в обескислороженной воде при помощи электрохимического анализатора (ЭА), датчик которого был установлен в центре аэрируемой системы (фиг. I). Результаты опытов представлены в таблице 2.

Необходимо отметить, что перенос кислорода проходит одновременно как через поверхность пузырьков, так и через открытую поверхность жидкости в аэрируемой системе.

Для вычисления истинных коэффициентов массопередачи необходимо, однако, рассмотреть эти процессы раздельно. Для определения скорости растворения кислорода только через поверхность жидкости нужно исключить барботаж, но сохранить при этом прежние гидродинамические условия, так как известно, что скорость абсорбции кислорода через поверхность воды зависит от поверхностной скорости движения воды $v_п$ , увеличиваясь с повышением последней.

Поверхностную аэрацию определяют обычно по Кингу [8]. Согласно Кингу при скоростях $v_п \leqslant 0{,}045$ м/сек скорость абсорбции кислорода находится в прямой зависимости от $v_п^{0{,}51}$. При больших скоростях поверхности воды скорость абсорбции кислорода через поверхность прямо пропорциональна $v_п^{1{,}75}$

( $K_n = 0,7\ v_n^{1,75}$), при этом верхний предел применимости этой зависимости не указывается.

Таблица 2

Определение общего коэффициента массопередачи

| Диаметр отверстий аэратора (мм) | Интенсивность аэрации ($м^3/м^2$.час) | Большая модель | Малая модель |
|---|---|---|---|
| | | $K_{общий}$ (1/час) | $K_{общий}$ (1/час) |
| 2,5 отв.вверх | 3 | $7,2 \cdot 10^{-1}$ | $5,4 \cdot 10^{-1}$ |
| | 7 | 1,76 | 1,80 |
| | 13 | 3,60 | 3,42 |
| 2,5 отв.вниз | 3 | $7,2 \cdot 10^{-1}$ | $5,1 \cdot 10^{-1}$ |
| | 7 | 1,76 | 1,44 |
| | 13 | 3,24 | 3,85 |
| 1,5 отв.вверх | 3 | $9,0 \cdot 10^{-1}$ | $6,1\ 10^{-1}$ |
| | 7 | 1,94 | 1,84 |
| | 13 | 3,60 | 3,85 |
| 1,5 отв.вниз | 3 | $8,3 \cdot 10^{-1}$ | $5,8 \cdot 10^{-1}$ |
| | 7 | 1,94 | 1,80 |
| | 13 | 3,35 | 3,85 |
| пористый | 3 | 3,17 | 3,02 |
| | 7 | 6,12 | 6,66 |
| | 13 | 9,72 | 10,33 |

Нами были проведены опыты для изучения поверхностной аэрации на малой модели, причем поверхностная скорость воды изменялась от 0,20 до 0,38 м/сек. Опыты проводились при выключенной пневматической аэрации.

Для создания циркуляции жидкости в эрационной камере была установлена вращающаяся крыльчатка с переменным числом оборотов. Скорость циркуляции на поверхности ( $v_n$ ) определялась микровертушкой, и одновременно измерялась скорость растворения кислорода в системе.

Результаты, полученные нами, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Определение коэффициента поверхностной аэрации

| Температура | $v_n$ (м/сек) | $K_n$ (I/час) |
|---|---|---|
| 20 °С | 0,20 | 0,I80 |
| | 0,24 | 0,240 |
| | 0,30 | 0,360 |
| | 0,38 | 0,540 |

После математической обработки результатов измерения мы получили для скорости растворения кислорода через поверхность воды следующее выражение:

$$K_n = 2{,}5\, v_n^{1{,}60}$$

где

$K_n$ - в I/час и $v_n$ - в м/сек

При измерении скорости растворения кислорода на практике результат обычно включает одновременно скорость растворения кислорожа через поверхность пузырьков и через поверхность воды (данные таблицы 2). Определение массопередачи через зеркало воды по предложенной выше методике позволяет расчленить эти процессы и проанализировать их раздельно.

## Выводы

I. В стесненных условиях всплывания пузырьков определение величины пузырьков, скорости их движения и площади межфазового контакта должно производиться раздельно в отдельных зонах по высоте их подъема статистическими методами.

2. Скорость всплывания пузырьков в стесненных условиях больше, чем одиночных пузырьков. Абсолютная скорость всплывания пузырьков зависит также от скорости циркуляции жидкости.

3. Площадь междуфазного контакта (пузырьков) практически не зависит от расположения отверстий аэратора (d = I... 2,5 мм), но зависит от расхода воздуха и размера отверстий.

4. Скорость растворения кислорода через зеркало воды составляет 3-20 % от общей скорости растворения кислорода.

Роль растворения кислорода через поверхность воды больше при меньших величинах интенсивности аэрации, так как поверхность контакта при меньших интенсивностях по величине сравнима с величиной поверхности воды.

При пористых аэраторах доля аэрации через зеркало воды незначительна (2 - 6 %).

## Литература


I. А.В. Городецкая. Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах Рейнольдса. "Журнал физической химии", вып. I, т.23, 1949.

2. А.Г. Паниш вили. Гидравлическая крупность воздушных пузырьков в условиях их взаимодействия. "Сообщение АН Грузинской ССР", № 6, т. 22, 1959.

3. В.Г. Левич. Физико-химическая гидродинамика. М., 1952.

4. Р.А. Меликян. Метод определения скорости всплытия газа в процессах газлифта и барботажа и характер ее изменения. "Журнал прикладной химии", № 12, т.42, 1969.

5. Х.А. Мёльдер. Исследование работы и моделирование песколовок с полигональным поперечным сечением (в печати - Известия вузов "Строительство и архитектура").

6. Установка для полной биологической очистки бытовых сточных вод БИО-25. ГПИ "Эстонпроект", 1969.

7. I. Horvath. Derzeitiger Stand des Problems der Ähnlichkeit und Maßvergrößerung auf dem Gebiet der Abwasserreinigung. Budapest. 1969.

8. H.R. King. Mechanics of Oxygen Absorption in Spiral Flow Aeration Tanks. - "Sewage and Ind. Wastes", No.8, 1955.

9. S. R a m a k r i s h n a n, R. K u m a r und N.R.K u l o o r. Der Einfluß der Orientierung der Austrittsöffnung auf die Blasenbildung unter konstanten Fließbedingungen. "Chem. Techn.", Vol. 22, No. 4, 1970.

10. W. S i e m e s. Chem. Ing. Techn. Vol. 26, No. 11, 1954.

H. Mölder, A. Ostrat, L. Paal

## The Investigation of Some Characteristics of Two-phase Systems on Aerated Sewage Treatment Models

Summary

The paper deals with the results of the laboratory investigations of hydrodynamics and the main characteristics of mass transfer in geometrically similar scale models of two-phase aerated systems. The size of interface contact surface and the velocity of bubble rise in separate zones in constraint floating conditions are determined.

The influence of orientation of orifices on the interface contact surface and the discharge of circulating flows depending on aeration intensity are examined.

The velocity coefficients of oxygen dissolution through the surface of bubbles and the water plane are determined.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 628.35:532.501

Х.А.Мёльдер, А.Л.Острат, Л.Л.Пааль

# ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ

В первой части нашей работы [2] были изучены различные факторы, характеризующие массопередачу (величина поверхности контакта фаз, движение пузырьков, гидродинамические условия аэрации и массопередача через поверхность пузырьков и зеркало воды).

Аэрируемая система представляет собой двухфазную систему. При аэрации в системе происходят одновременно гидродинамический и физико-химический процессы (массопередача).

Задачей настоящей работы являлось установление связи между величинами, характеризующими массопередачу, и величинами, характеризующими гидродинамические условия аэрации в канализационных очистных сооружениях. Как известно, гидродинамические условия в аэрационной системе определяются геометрическими свойствами системы и динамическими параметрами процесса аэрации. На массопередачу оказывают влияние также физико-химические свойства сред.

Гидродинамика барботажа основывается на многочисленных опытных данных, которые обрабатываются при использовании основных законов гидродинамики с применением теории подобия и других методов. Полученные в результате закономерности, они носят в основном эмпирический характер. При описании процесса критериальными уравнениями в них включают обычно 8-9 критериев, что слишком громоздко для практического применения.

Для обобщения и систематизации опытного материала Левш и Ниязов [I] предлагают исходить из следующих положений:

I) Описание гидродинамики барботажа должно основываться на 2-3 простых комплексах, имеющих достаточно продуманный вид.

2) В основу расчета гидродинамических режимов необходимо положить величину, характеризующую интенсивность перемешивания.

3) Вязкость жидкости представляет один из важнейших факторов барботажа, что вытекает из основных законов и критериев гидродинамики. Влияние вязкости газа значительно меньше из-за малых абсолютных ее значений и небольшой весовой доли газа в двухфазной системе.

При массопередаче довольно сложным является выбор закона моделирования. Поэтому Хорват [5] предлагает использовать несколько законов одновременно и тем самым расширить возможности моделирования. Но если использовать различные законы моделирования одновременно, то это может привести к противоречиям между инвариантами трансформации.

Учитывая это, Хорват рекомендует исходить не из отдельных бездименсионных чисел, а найти уравнение, которое описывает изучаемый процесс.

Для моделирования аэрационных систем типа Кессенера Хёрлер [6] использовал закон Фруда. Законом Фруда пользовался также Фишерштром [4] при моделировании аэрационной системы типа Инка.

Чтобы охарактеризовать массопередачу, предлагается применять критерий Нуссельта, причем характерной величиной выбран $K_L a$ (коэффициент массопередачи)

$$K_L a = \frac{K \cdot V}{F_к}.$$

Для характеристики гидродинамических условий нами использованы критерии Рейнольдса, Фруда и критерий Г (геометрический комплекс), характеризующий геометрию аэрируе-

мой системы. Критерии Прандтля и Вебера, которые также применяются некоторыми авторами, в условиях проведения наших опытов являлись величинами постоянными и поэтому в состав критериального уравнения не включены.

Перечисленные выше критерии определяются следующим образом:

$$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}, \qquad (I)$$

где $v$ – средняя расходная скорость в нижней части аэрационной системы (м/сек);

$h$ – высота поперечного сечения потока, в котором $v$ является средней скоростью $\left(h \approx \frac{H}{2}\right)$ (м);

$H$ – высота слоя воды (м);

$\nu$ – кинематическая вязкость воды ($м^2$/сек).

Поскольку

$$v = \frac{Q}{L \cdot h}, \qquad (2)$$

где $Q$ – расход циркулирующего потока ($м^3$/сек);

$L$ – ширина системы (м),

то

$$Re = \frac{Q}{L \cdot \nu}. \qquad (3)$$

Критерий Фруда определяется в виде

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot h}, \qquad (4)$$

а критерий геометрического комплекса как

$$\Gamma = \frac{L}{H}. \qquad (5)$$

Критерий Nu обычно имеет вид

$$Nu = \frac{K \cdot V \cdot h_1}{F_к \cdot D}, \qquad (6)$$

где $h_1$ – глубина аэротенка (м);

$K$ – коэффициент массопередачи (I/сек);

$V$ – объем аэрируемой системы ($м^3$);

$F_к$ – поверхность контакта фаз ($м^2$);

$D$ – коэффициент молекулярной диффузии; рассчитан по формуле Уилки и Чанг [3] как

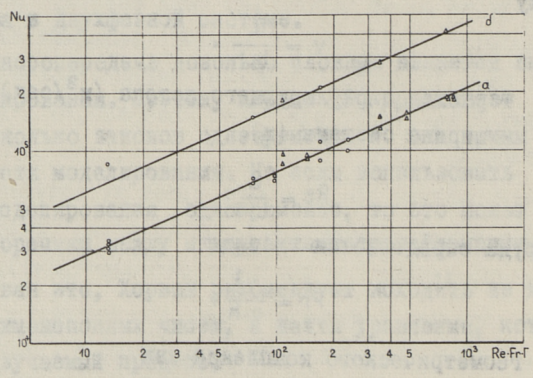
$$D = \frac{7,4 \cdot 10^{-12} (x \cdot M)^{\frac{1}{2}} \cdot T}{r \cdot V_A^{0,6}} \quad м^2/сек, \qquad (7)$$

где M – молекулярная масса растворителя;
x – поправочный коэффициент;
T – температура;
$V_A$ – молекулярный объем кислорода;
r – динамическая вязкость воды.

На основе этих критериев нами было составлено критериальное уравнение в виде

$$Nu = A \cdot (Re \cdot Fr \cdot \Gamma)^n. \qquad (8)$$

Параметры указанного уравнения были нами определены по данным проведенных экспериментов [2].




**Фиг. 1. График зависимости** $Nu = f(Re \cdot Fr \cdot \Gamma)$

На фиг. I изображен график зависимости (8). При помощи математической обработки результатов получено, что $A = I,047 \cdot I0^4$ и $n = 0,434$, а зависимость (8) получается как

$$Nu = I,047 \cdot I0^4 \, (Re \cdot Fr \cdot \Gamma)^{0,434}. \qquad (9)$$

Коэффициент A зависит от конструкции аэратора (дырчатый, пористый), а показатель степени n, очевидно, от конфигурации поперечного сечения фрагмента системы.

## Литература


I. И.Т. Левш, М.И. Ниязов. К прикладной гидродинамике барботажа. Труды Ташкентского ПИ, вып. 55, 1969.

2. Х.А. Мёльдер, А.Л. Острат, Л.Л. Паальъ. Исследование некоторых характеристик двухфазных систем на моделях аэрируемых канализационных очистных сооружений (см. настоящий сборник, стр. 81 ).

3. В.М. Рамм. Абсорбция газов, М., 1966.

4. N.C. Fischerström. Low Pressure Aeration of Water and Sewage. "Proc. ASCE San. Eng. Div.", 86, SA 5,1960.

5. I. Horwath. Derzeitiger Stand des Problems der Ähnlichkeit und Maßvergrößerung auf dem Gebiet der Abwasserreinigung. Budapest. 1969.

6. A. Hörler. Allgemeine Betrachtungen zum Vergleich von Belüftungssystemen. Zürich. 1963.



H.Mölder, A.Ostrat, L.Paal


## Hydrodynamic Modelling of Sewage Treatment Plants be Means of Similarity Criteria of Two-phase Systems


### Summary

Some results of the investigations of the connections between the values characterizing mass transfer and values characterizing hydrodynamic conditions of aeration in sewage treatment plants are stated in this paper.

The Nusselt criterion is used to characterize the mass transfer, the hydrodynamic conditions are characterized according to Reynolds, Froude criterion and geometric complex (Γ).

The equation $Nu = 1{,}047 \cdot 10^{4} (Re \cdot Fr \cdot \Gamma)^{0{,}434}$ is obtained.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 536.248.2:519.282

Г.С. Ерет

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА ЭВМ

Как при проектировании, так и при выборе оптимальных режимов эксплуатации теплообменных аппаратов и трубопроводов, где имеют место сложные процессы взаимосвязанного тепло- и массообмена в виде капельной конденсации, этот процесс рассматривают квазистационарным. В действительности цикл существования (возникновение, рост и исчезновение) капелек является нестационарным процессом, так как, во-первых, капельки могут возникать в любой момент и на любом месте в пределах поверхности конденсации. Во-вторых, их рост происходит или в убывающем темпе, или скачкообразно (в случае слияния с соседними капельками). В-третьих, исчезновение (скольжение) капельки, расположенной на наклонной поверхности конденсации и достигшей критических размеров, сопровождается поглощением попутных капелек. Таким образом, положение на поверхности конденсации постепенно меняется. Поэтому считать процесс капельной конденсации квазистационарным допустимо лишь при наличии характеризующих параметров, осредненных во времени и по поверхности. Получение таких параметров для всевозможных конструктивных решений и условий эксплуатации опытным путем связано с огромными затратами средств и времени. Гораздо более эффективным является применение ЭВМ, т.е. определение требуемых параметров путем математического моделирования процесса капельной конденсации.

При постоянстве физических параметров как конденсирующегося пара, так и жидкости, которая охлаждает поверхность

конденсации, интенсивность капельной конденсации определена размерами капелек. Поэтому и первичными результатами моделирования должны быть количество и размеры капелек в модели, т.е. на исследуемой поверхности конденсации. Ввиду дискретной работы ЭВМ эти результаты отражают состояние модели после завершения очередного цикла моделирования. Повторение циклов приводит к стабилизации модели, т.е. к получению осредненных во времени результатов.

Представленная ниже схема моделирования процесса капельной конденсации в сравнении со схемой, принятой Гоузом [3], более совершенная ввиду следующих особенностей:

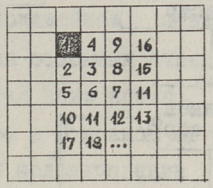
а) действительная кругообразная форма контактной поверхности моделируемой капельки заменена прямоугольной;

б) капельки, вводимые в модель в течение очередного цикла моделирования, расстанавливаются случайно;

в) наличие критериев скатывания позволяет применять схему и для криволинейной поверхности конденсации.

Из работ Фатика [4] и Иванова [1,2] следует, что в условиях капельной конденсации радиус растущей капельки увеличивается линейно во времени во второй степени. В представленной схеме за основу принят прирост контактной поверхности капельки в течение цикла моделируемого процесса. Ввиду того, что протяженность цикла постоянная, указанный прирост равняется контактной поверхности капельки, которая вводится в модель в ходе моделирования очередного цикла, чтобы имитировать возникновение новой капельки. Замена на модели действительной (кругообразной) формы контактной поверхности указанной капельки элементарным квадратом (основным) значительно упрощает процесс моделирования. При этой замене проверка на слияние соседних капелек происходит по содержанию квадратов (ячеек) и отпадает надобность проведения контрольных расчетов по заранее составленному списку соседних капелек, как это было сделано Гоузом [3]. На модели в каждом следующем цикле к основному квадрату прибавляется еще один квадрат (вспомогательный). Таким образом, контактная

поверхность моделируемой капельки состоит из одного основного и нескольких вспомогательных квадратов, причем сумма квадратов соответствует числу пройденных циклов, т.е. времени существования капельки. Порядок прибавления вспомогательных квадратов, т.е. порядок увеличения контактной поверхности моделируемой капельки, представлен в виде схемы на фиг. I.

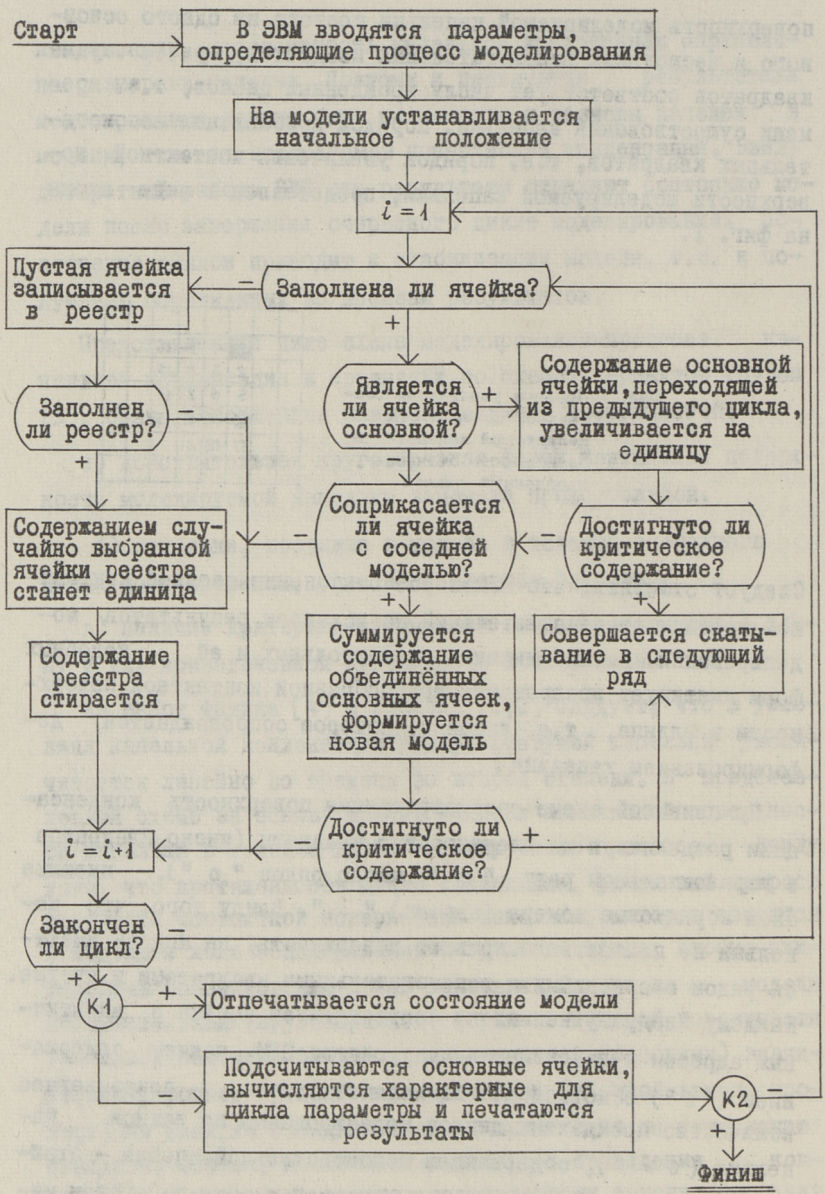



Фиг. 1 Порядок увеличения контактной поверхности моделируемой капельки в зависимости от числа пройденных циклов

Следует отметить, что некоторое отклонение сложной контактной площади от действительной не искажает результатов моделирования. Именно наличие прямоугольных и ей подобных форм имитирует превращение кругообразной контактной поверхности в эллипс, т.е. явление, которое сопровождается деформированием капельки.

По принятой схеме рассматриваемая поверхность конденсациии разделяется на элементарные квадраты (число квадратов в горизонтальном ряду " m ", число рядов " p "), имеющие свои порядковые номера (адреса) " i ". Ввиду того, что капельки не полностью покрывают поверхность, на модели имеются рядом с основными и вспомогательными квадратами и пустые. Каждому квадрату на модели соответствует ячейка с идентичным адресом в запоминающем устройстве ЭВМ, причем содержанием (" c ") основной ячейки является число, показывающее количество пройденных циклов моделирования по данной капельке ( $c \geqslant 1$ ), содержанием вспомогательной ячейки - отрицательное число - адрес своей основной ячейки со знаком минус ( $c < 0$ ). У пустых ячеек содержания нет ( $c = 0$ ).

Для получения случайного расположения первичных капелек, вводимых в ходе очередного цикла в модель, адреса пустых




Фиг. 2. Укрупненный вид блок-схемы

ячеек при текущем просмотре записываются в реестр заранее заданной емкости. После заполнения реестра из него выбирается случайный адрес, т.е. ячейка, содержанием которой становится единица, после чего содержание стирается, чтобы со следующей пустой ячейки начинать новый счет.

По сравнению со схемой, принятой Гоузом [3], данная схема является универсальной, так как позволяет моделировать процессы капельной конденсации, протекающие как на горизонтальной, так и на наклонной или криволинейной поверхности благодаря наличию в схеме проверки основных ячеек на скатывание. В натуре капелька скатывается вниз после достижения критического объема, зависящего в основном от угла наклона поверхности конденсации. При моделировании адрес ячеек увеличивается на " m " в том случае, когда содержание основной ячейки равно или больше соответствующего критерия скатывания, выраженного как кратность объема первичной капельки. В интересах значительного упрощения процесса моделирования в данной схеме сдвигается не вся модель капельки, а только полоса, состоящая из основной и нескольких вспомогательных ячеек. В отношении отражения действительности такая замена вполне корректна, так как с точки зрения захвата попутных капелек интерес представляет только ширина контактной поверхности.

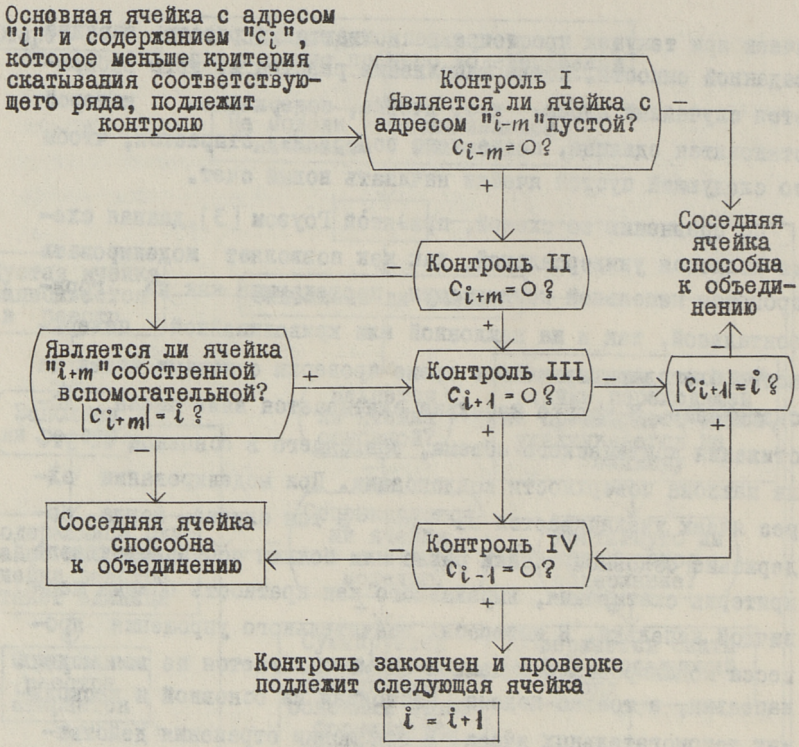
Укрупненный вид принятой нами схемы для моделирования процесса капельной конденсации представлен на фиг. 2. Она состоит из подготовительной, совершающей и анализирующей части.

В подготовительной части вводятся в ЭВМ следующие параметры, определяющие процесс моделирования:

а) размеры модели ("m" и "p") и критерии скатывания;

б) емкость (длина) реестра пустых ячеек и количество основных ячеек, вводимых в модель в течение цикла;

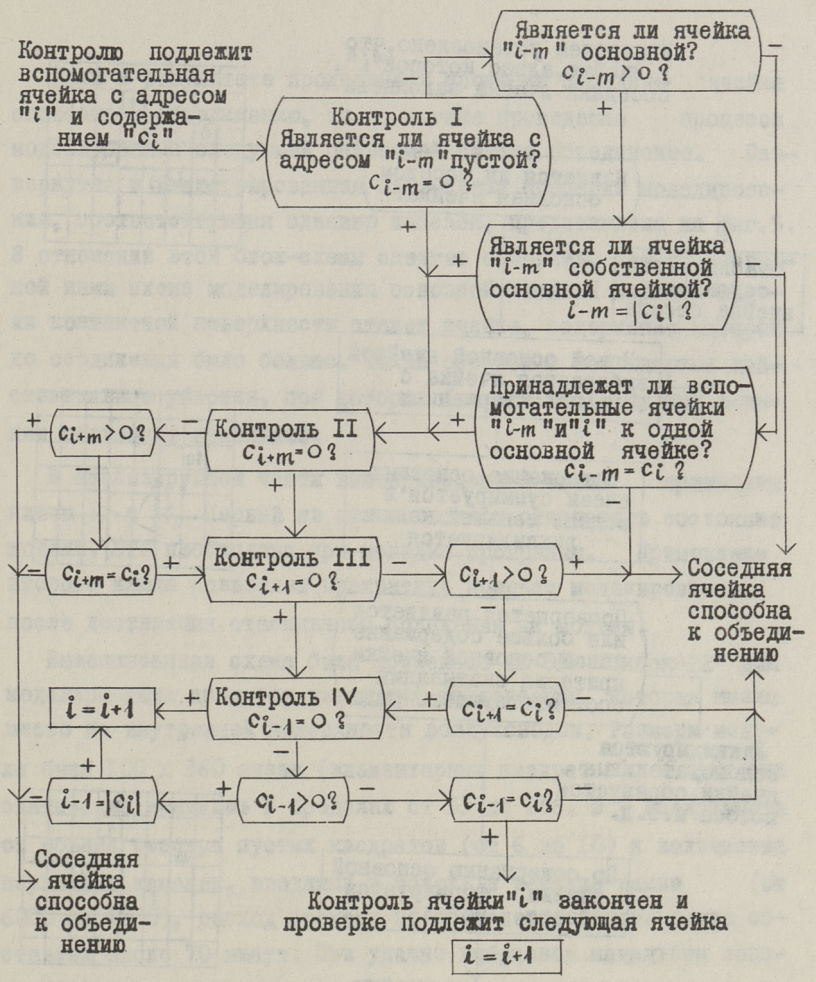
в) распорядок прибавления вспомогательных ячеек и основной (см. фиг. I).




Фиг. 3. Блок-схема контрольных операций с основной ячейкой

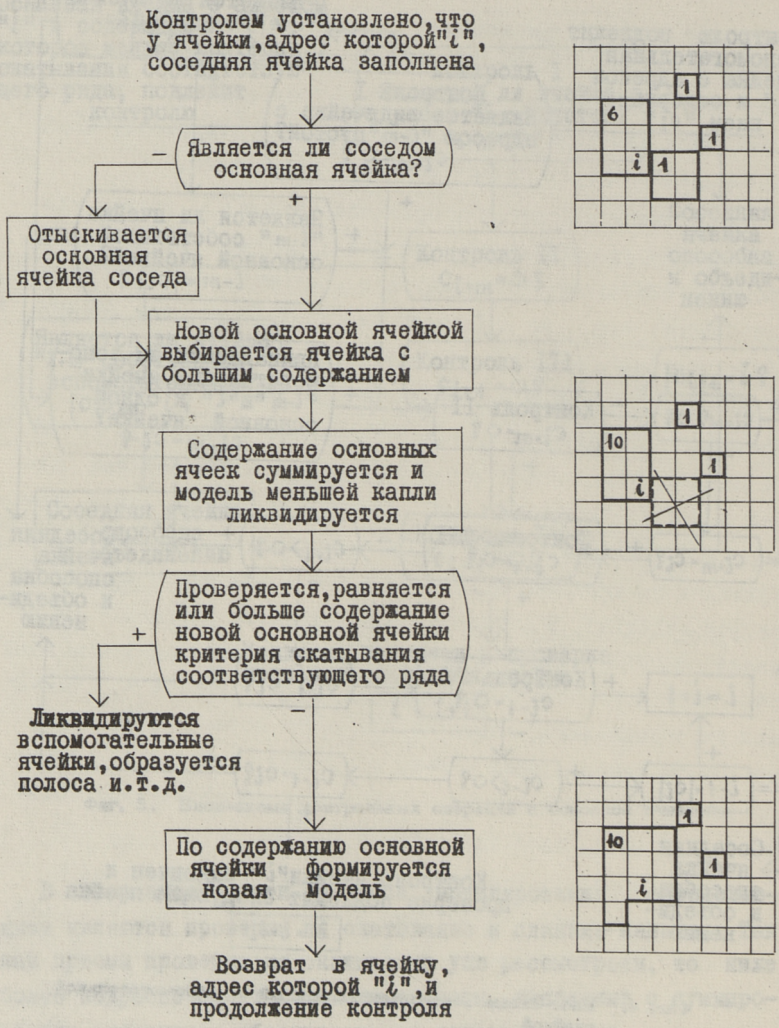
В совершающей части процесса моделирования определяющими являются проверки на скатывание и слияние капелек. Так как приемы проверки на скатывание уже рассмотрены, то ниже более подробно будут изложены вопросы, связанные с суммированием содержания объединяющихся основных ячеек, т.е. рассмотрен скачкообразный рост капельки.

Каждая основная ячейка, адрес которой " i ", имеет потенциальные возможности объединиться с четырьмя соседними ячейками, расположенными выше и ниже, правее и левее ее. з фиг. 3 видно, что в таком порядке и осуществляется проверка, которая базируется на сравнении содержания проверяемых ячеек.




**Фиг. 4. Блок-схема контрольных операций со вспомогательной ячейкой**

Проверки вспомогательной ячейки на объединение, схема которых представлена на фиг. 4, по принципу аналогичные, но количество проверочных операций в сравнении с основной ячейкой больше, так как при всех проверках надо просмотреть по три варианта.




**Фиг. 5. Развернутая и иллюстрированная блок-схема операций моделирования, соответствующих слиянию капелек**

Если в результате проделанной проверки соседняя ячейка способна к объединению, то по логике проведения процесса моделирования следующей операцией станет объединение. Развернутая и иллюстрированная блок-схема операции моделирования, соответствующая слиянию капелек, представлена на фиг.5. В отношении этой блок-схемы следует отметить, что по выбранной нами схеме моделирования основной ячейкой сложной модели контактной поверхности станет ячейка, содержание которой до соединения было больше. Таким образом и соблюдаются действительные условия, при которых большие капельки при слиянии поглощают маленькие.

В анализирующей части вышеприведенной схемы применены ключи $K_1$ и $K_2$. Первый из них позволяет отпечатать состояние модели. Это необходимо при наладке программы. Применение второго ключа позволяет прекратить процесс моделирования после достижения стабильного положения на модели.

Вышеописанная схема была применена на ЭВМ "Минск-22" для моделирования процесса капельной конденсации, которая имела место на внутренней поверхности воздуховодов. Размеры модели были 100 x 360 ячеек (элементарных квадратов), и критерии скатывания менялись в пределах от 33 до 136. В зависимости от объема реестра пустых квадратов (от 6 до 10) и количества первичных капелек, вводимых в модель в течение цикла (от 6000 до 4000), расход времени на проведение одного цикла составлял около 70 минут. При удачно выбранном начальном положении состояние на модели стабилизировалось в среднем после 14-го цикла.

## Литература

I. В.В. Иванов. О росте капель при конденсации. Изв. вузов "Физика", 3, 1962.

2. В.В. Иванов. Исследование роста капель в парогазовой среде. Изв. вузов Энергетика, 5, 1965.

3. E.E. Gose, A.N. Mucciardi, E. Baer. Model for Dropwise Condensation on Randomly Distributed Sites. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 10, 1967.

4. N. Fatica, D.L. Katz. Dropwise Condensation. Chem. Engineering Progress. Vol. 45, 1949.

G.Jeret

Simulation of the Dropwise Condensation Process on a Digital Computer

Summary

The main difference of the presented scheme in comparison with previously proposed schemes is that the real circular contact area of simulated drops is replaced by a rectangular one consisting of elementary squares. This replacement gives the opportunity to simulate the dropwise condensation process on a digital computer with restricted operative memory. The presence of slid criteria in the simulated scheme allows to apply the presented scheme for curvilinear surface condensation.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 681.14.001.57

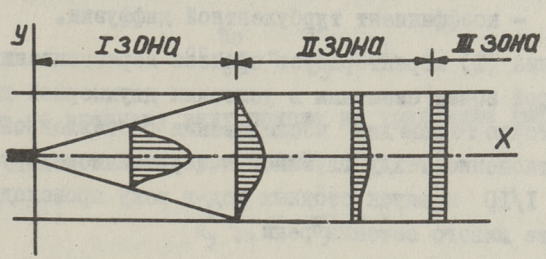
Л.И. Руга

# ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ВЕЩЕСТВА ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ВОДОТОКАХ

Реки представляют собою одну из разновидностей канализационных очистных сооружений. Здесь происходит дальнейшая очистка сточных вод в результате разбавления, выделения и других превращений.

При прогнозе качества воды в реке с учетом самоочищения реки надо считаться с закономерностями диффузии веществ загрязнения.

Процесс перемещения струй сточных вод с водой реки условно делится на три зоны (фиг. I).




Фиг.1

I – так называемая струйная часть диффузии, где вещества загрязнения не распространились еще по всей ширине русла;

II – происходит трехмерная диффузия вещества загрязнения (при малой глубине потока – двухмерная);

III – начинается с того сечения, в котором концентрация вещества загрязнения почти одинакова по всему живому сечению потока; происходит так называемая продольная диффузия вещества загрязнения.

Настоящая статья показывает возможность исследовать методом электрического моделирования смешение сточных вод в прямолинейном потоке при условиях стационарного впуска. Как и в работе Н.Н. Лапшева и Ю.Б. Безобразова [7], в качестве начального условия принято, что струи сточных вод поступают в водоток из сосредоточенного выпуска, имеющего вид прямоугольника, причем концентрация загрязнения во всех его точках одинакова.

Исходя из схемы (фиг. I), взятой из работы Л.Л. Пааля [8], согласно которой сточные воды поступают в водоток в виде струи, можно процесс смешения сточных вод охарактеризовать дифференциальным уравнением, предложенным А.В. Караушевым [4]

$$v_x \frac{\partial s}{\partial x} - K_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = 0, \qquad (I)$$

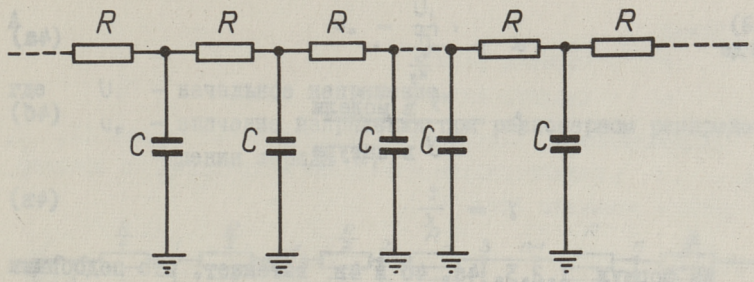
где $s$ – показатель концентрации вещества загрязнения;

$v_x$ – скорость течения потока;

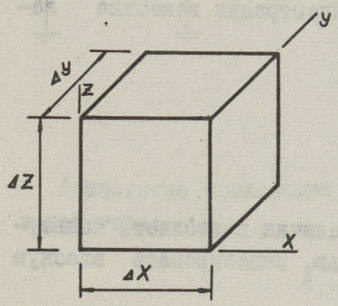
$K_y$ – коэффициент турбулентной диффузии.

Уравнение (I) характеризует процесс перемешивания в первой и второй зонах смешения в условиях двухмерной диффузии. Оно достаточно точное для исследования поставленной задачи, так как отношение между глубиной и шириной моделируемой реки меньше I/IO и впуск сточных вод в реку происходит по всей высоте живого сечения реки.

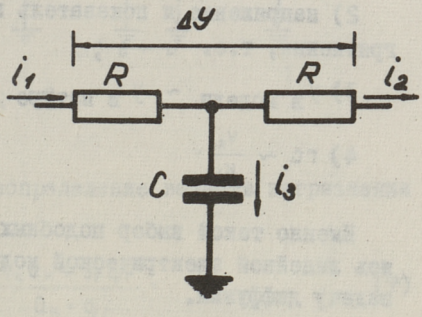
Плоскую задачу диффузии можно моделировать при помощи линейной электрической R – C модели (фиг. 2), принципиальная схема которой опубликована автором уже раньше [7]. Моделируемый элемент реки представляет собою параллелепипед размерами $\Delta x$, $\Delta y$ и $\Delta z$ (фиг. 3).




Фиг.2




Фиг.3




Фиг.4

Электрический процесс в модели описывается уравнением

$$rc\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \qquad (2)$$

которое по внешнему виду похоже на уравнение диффузии (I).

При сопоставлении уравнений

$$\frac{v_x}{K_y}\frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = 0$$

и

$$rc\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

можно на основании правила Фурье [I] критерий подобия написать в виде

$$\frac{\alpha \cdot \beta^2}{\gamma} = 1, \qquad (3)$$

где $$\alpha = \frac{rc}{\frac{v_x}{k_y}}, \qquad (4а)$$

$$\beta = \frac{y \text{ в модели}}{y \text{ в натуре}}, \qquad (4б)$$

$$\gamma = \frac{t}{x}. \qquad (4в)$$

Из формул I,2,3, 4а, 4б и 4в вытекает, что подобными величинами в данном случае являются:

I) время электрического процесса и расстояние по оси реки в процессе диффузии, т.е. $t \sim x$;

2) напряжение и показатель концентрации вещества загрязнения, т.е. $u \sim s$;

3) $y_{\text{в модели}} \sim y_{\text{в натуре}}$;

4) $rc \sim \frac{v_x}{k_y}$.

Именно такой выбор подобных величин позволяет, пользуясь линейной электрической моделью, моделировать плоскую задачу диффузии.

На фиг. 4 представлен типичный узел электрической модели, соответствующий параллелепипеду размерами $\Delta x$, $\Delta y$, $\Delta z$. Цепь из таких типичных узлов является электрической моделью реки или канала, действующей беспрерывно во времени и дискретно в направлении оси $y$.

Начальный заряд $Q_1$, соответствующий количеству вещества загрязнения в начальном поперечном сечении, распределяется между отдельными узлами модели, замещающими ширину элемента реки $y$ (фиг. 5).

Перераспределение начального заряда $Q_1$, зависящее от параметра модели $rc$ и количества типичных узлов $n$, кончается через некоторое время, отмечающее начало третьей зоны смешения. С этого момента заряд $Q_1$ практически равномерно распределен между всеми узлами модели

$$q_0 = \frac{Q_1}{n}, \qquad (5)$$

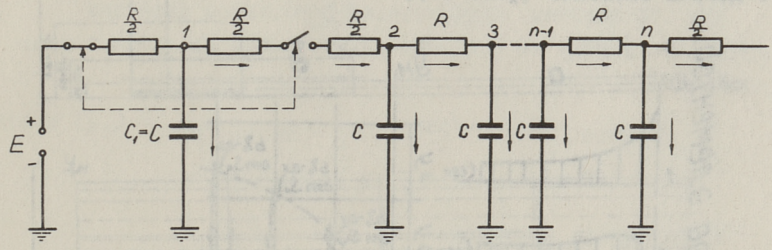
где $q_0$ – значение равномерно распределенного заряда;
$n$ – количество типичных узлов модели.

А

$$u_0 = \frac{U_1}{n}, \qquad (6)$$

где $U_1$ – начальное напряжение,

$u_0$ – значение напряжения при равномерном распределении заряда $Q_1$.




Фиг.5

Аналогично происходит распределение веществ загрязнения в водотоке:

$$S_0 = \frac{S_к Q_к + S_р q_р}{Q_к + q_р}, \qquad (7)$$

где $S_0$ – концентрация веществ загрязнения в третьей зоне реки (фиг. I);

$S_к$ – естественная концентрация веществ загрязнения в реке;

$S_р$ – концентрация веществ загрязнения в впускаемой сточной воде;

$Q_к$ – расход потока в реке;

$q_р$ – количество впускаемых сточных вод.

Если $S_к \approx 0$ и $q_р << Q_к$, то формула (7) принимает вид

$$S_0 = \frac{S_р q_р}{Q_к}, \qquad (8)$$

где

$$Q_к = \int_\omega v_x d\omega = v_x H B, \qquad (9)$$

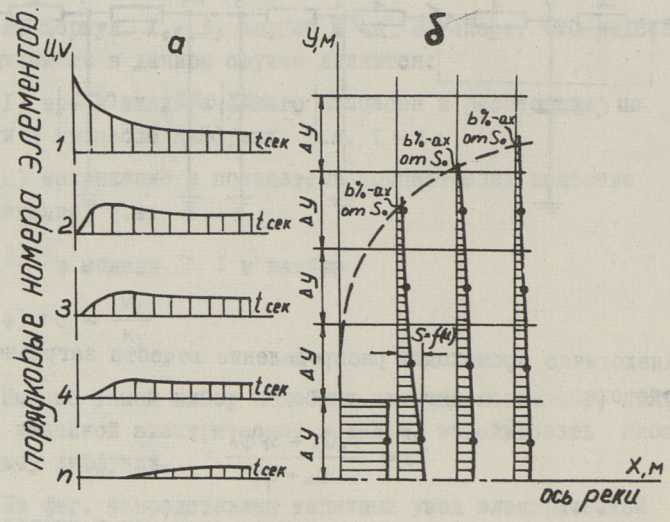
$$d\omega = H dy. \qquad (10)$$

Здесь

H – глубина реки;

ω – площадь живого сечения реки.

Осциллограммы, взятые из отдельных точек модели (I, 2, 3, ..., n ), характеризуют изменение напряжения во времени в данном элементе (фиг. 6а).



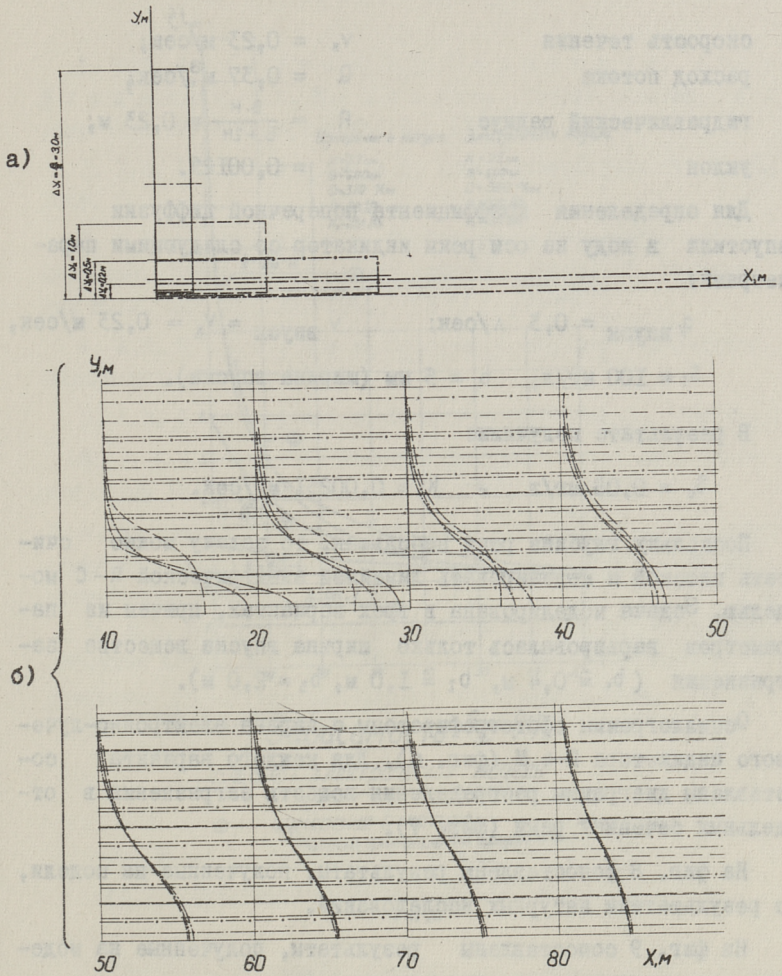

Фиг.6

Сравнение отдельных осциллограмм позволяет определить концентрацию вещества загрязнения во всех точках реки и составить диаграмму распределения вещества загрязнения для любого сечения реки (фиг. 6б).

В целях проверки описанной методики объектом моделирования была выбрана река Вяяна, где аспирант кафедры санитарной техники ТПИ В. Сууркаск провел натурные измерения для определения коэффициента поперечной диффузии [7]. Характеристики реки следующие:

средняя ширина B = 6 м;

средняя глубина H = 0,27 м;




Фиг. 7.

а) Количество впускаемого вещества загрязнения одинаково при всех вариантах: $b_1 = 2\Delta y_1 = 6{,}0$ м; $b_2 = 2\Delta y_2 = 2{,}0$ м; $b_3 = 2\Delta y_3 = 2{,}0$ м; $b_4 = 2\Delta y_4 = 0{,}4$ м.

б) Поле концентрации веществ загрязнения в зависимости от ширины впуска при x = 0 до x = 80 м.

скорость течения $v_x = 0{,}23$ м/сек;

расход потока $Q = 0{,}37$ м$^3$/сек;

гидравлический радиус $R = \frac{B \cdot H}{B + 2H} = 0{,}23$ м;

уклон $i = 0{,}00125$.

Для определения коэффициента поперечной диффузии впустили в воду на оси реки индикатор со следующими параметрами:

$q_{\text{впуск}} = 0{,}3$ л/сек; $v_{\text{впуск}} \approx v_x = 0{,}23$ м/сек;

$S_1 = 100$ мг/л; $b = 5$ мм (ширина впуска).

В результате получили:

$S_0 = 0{,}08$ мг/л и $K_y = 0{,}00251$ м$^2$/сек.

Поскольку глубина реки небольшая, то задачу можно считать плоской и моделировать линейной электрической R-C моделью. Задача моделирована в трех вариантах, причем из параметров варьировалась только ширина впуска вещества загрязнения ($b_1 = 0{,}4$ м, $b_2 = 1{,}0$ м, $b_3 = 2{,}0$ м).

Осциллограммы сфотографированы с экрана электронно-лучевого индикатора И-4 М (фиг. 6). Для каждого варианта составлены диаграммы распределения веществ загрязнения в отдельных сечениях реки (фиг. 7).

На фиг. 8 сопоставлены результаты, полученные на модели, с результатами натурных исследований.

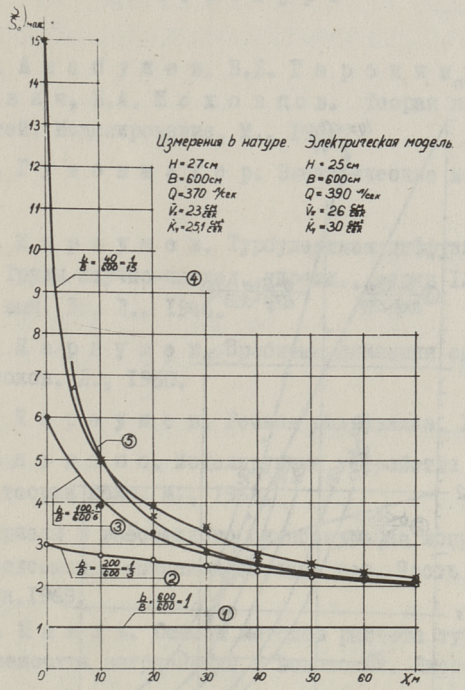
На фиг. 9 сопоставлены результаты, полученные на модели, с аналитическим решением задачи.

## Выводы

1. Результаты, полученные на электрической модели, достаточно хорошо согласуются с результатами натурных измерений (фиг. 8). Различия между кривыми 4 и 5 объясняются:

а) неравномерностью натурного процесса;

б) различием в площади впускного отверстия;




Зависимость $\frac{S_{max}}{S_0}(x)$.

①, ②, ③, ④ - электрическая модель.
(различные ширины выпуска)

⑤ - измерения в натуре.
(ширина прямоугольного выпуска 5 мм)

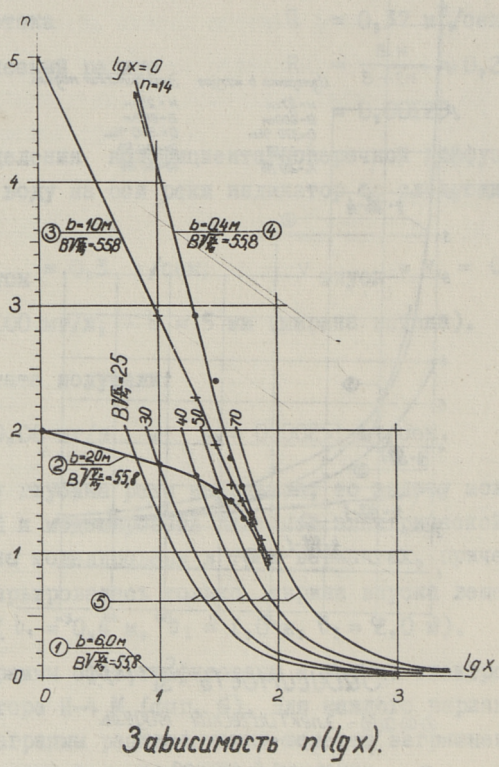
Фиг.8

в) точностью измерений как в натуре, так и на модели.

2. Результаты, полученные на электрической модели, хорошо согласуются с аналитическим решением (фиг. 9).

3. Моделирование позволяет легко определить влияние ширины впускного отверстия на поле концентрации веществ загрязнения (фиг. 7,8,9).

Полученные результаты заключают в себе и решение задачи с боковым выпуском сточных вод в направлении течения.




Зависимость $n(lgx)$.

①, ②, ③, ④ – электрическая модель.
(различные ширины выпуска)

⑤ – аналитическое решение.
(выпуск из точки)

**Фиг. 9. Ордината графика** $n = \frac{S_{макс}}{S_0} - 1$

4. Модель состоит только из омических сопротивлений и конденсаторов, ее конструкция очень проста.

5. Точность измерения зависит от качества использованных сопротивлений и конденсаторов и от точности измерительных приборов.

6. Моделирование дает возможность оценить влияние изменения ширины и глубины реки на поле концентрации веществ загрязнения.

## Литература


I. П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус, Л.М. Минкевич, Б.А. Шеховцов. Теория подобия и размерностей. Моделирование, М., 1968.

2. Л.И. Гутенмахер. Электрические модели. М.-Л., 1949.

3. В.А. Карауше в. Турбулентная диффузия и метод смешения. Труды научно-исслед. учрежд., серия IУ, Гидрология суши, вып. 30, Л., 1946.

4. А.В. Карауше в. Проблемы динамики естественных водных потоков. Л., 1960.

5. А.В. Карауше в. Речная гидравлика. Л., 1969.

6. У. Карплюс. Моделирующие устройства для решения задач теории поля. М., 1962.

7. Материалы Ш всесоюзного симпозиума по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Часть I и П, Москва-Таллин, 1969.

8. Л.Л. Паальь. Основы методов расчета турбулентной диффузии вещества загрязнения в водотоках. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Таллин, 1970.



L. Ruga


The Electric Modelling of the Turbulent Diffusion of the Pollution Substance in the Water Flows


Summary

The principal solution of the sewage mixing in water flows by means of the electric R-C model is discussed in the article.

The results of the study by the electric modelling have been compared with the analytical solution of the problem and with some measurements of the pollution substance diffusion in rivers and canals.

Diagrams representing the correlation between the spread out of sewage concentration and the extent of outflow are presented.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 621-82-225

Э.Г. Каск, У.Р. Лийв

# ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

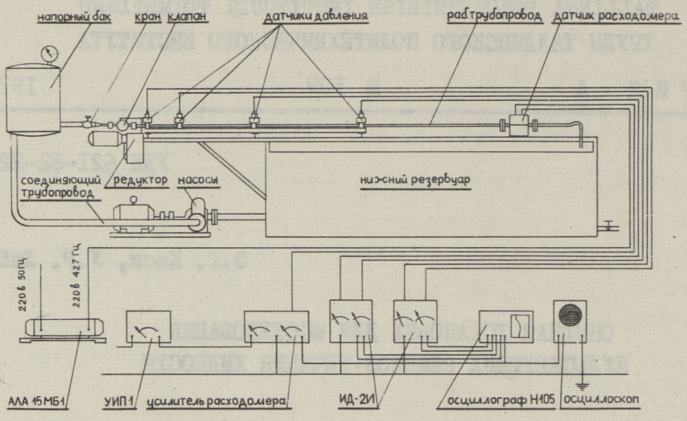
В настоящее время все чаще в технологических гидравлических системах возникают задачи нестационарных режимов течения жидкости. Одним из частных случаев нестационарного течения являются пульсирующие режимы. Нередко такие течения характеризуются высокими в обычном смысле параметрами течения: ускорения достигают нескольких сот м/сек$^2$, а частоты измеряются десятками герц. При этом длины трубопроводов таких систем могут быть незначительные, что позволяет рассматривать системы как состоящие из коротких трубопроводов.

Для исследования таких систем в лаборатории гидротехники Таллинского политехнического института построена опытная установка (фиг. 1), которая состоит из двух основных частей: гидравлической и электроизмерительной.

Гидравлическая часть состоит из следующих основных частей:

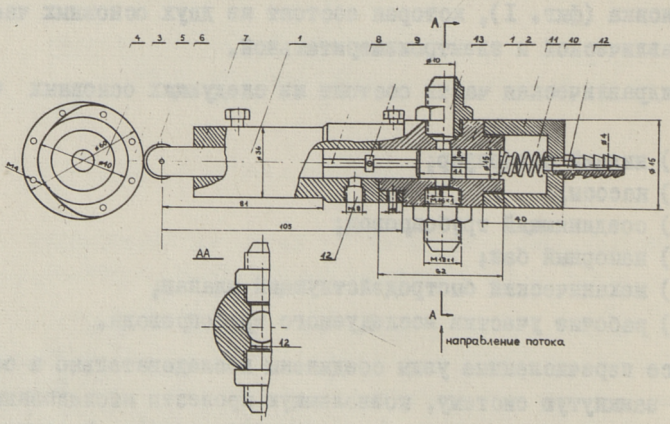
1) нижний резервуар;
2) насосы;
3) соединяющий трубопровод;
4) напорный бак;
5) механический быстродействующий клапан;
6) рабочие участки исследуемого трубопровода.

Все перечисленные узлы соединены последовательно и образуют замкнутую систему, позволяющую провести исследования с жидкостями, обладающими различными физическими характеристиками. В качестве насосов на установке применяются два по-




Фиг. 1

следовательно соединенных насоса марки 2К6, которые обеспечивают установку напором $p = 6$ кг/см$^2$ при расходе $Q = 2{,}8$ л/сек. Объем напорного бака составляет 130 литров. Вслед за напорным баком установлены кран для изменения стационарных расходов и механический быстродействующий клапан. Основными узлами клапана являются асинхронный двигатель мощностью 120 ватт, фрикционный редуктор и собственно клапан (фиг.2). Фрикционный редуктор позволяет плавно изменять

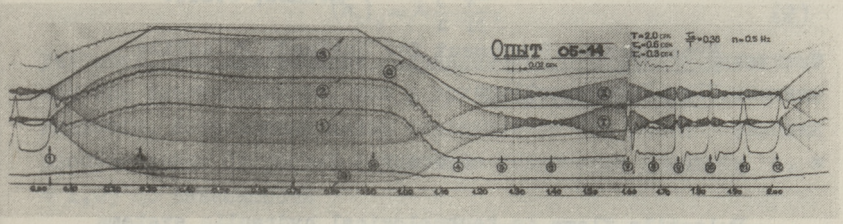



Фиг. 2

скорость вращения выходного вала. На выходном вале (4) установлен эксцентрический шаблон (5), который является задающим органом пульсирующего движения. При вращении шаблона на него упирается шариковый подшипник с штоком, связанный жестко с плунжером, который при движении прикрывает свободное отверстие клапана. Обратный ход плунжера обеспечивается пружиной. Применяемая конструкция клапана позволяет исследовать пульсирующие потоки частотой до 10 гц. При исследовании трубопроводов диаметром до 10 мм на рабочем участке были обеспечены средние скорости v = 10 м/сек.

Электроизмерительная часть представлена на фиг. 1. Основными узлами части являются системы для измерения давления и расхода. В качестве датчиков давления применяются стандартные датчики ДД-10 со вторичным прибором ИД-2И. Пределы измерения датчиков ДД-10-6 кг/см$^2$. Расход на стенде измеряется электромагнитным способом (1). Усилитель к датчику построен специально для измерений быстропеременного расхода и обладает малой постоянной времени. Для питания датчика расходомера применяется генератор АЛА-1,5.

Все измеряемые величины записываются при помощи осциллографа Н-105 на фотобумагу шириной 120 мм. Одна из полученных осциллограмм опыта 05-14 представлена на фиг. 3.




Фиг. 3

Частота пульсации при опыте равна 0,5 гц. На осциллограмме под номерами 1,2 и 3 обозначены показания датчиков давления ДД-10. Буквой "О" изображается ход плунжера, приводя-

щего в движение плунжер затвора, а буквой "Б" - базис на осциллограмме. Цифрами I и II обозначены синусоидальные колебания выхода усилителей датчика для измерения средней скорости. При этом величина выходящей амплитуды прямо пропорциональна средней скорости движения жидкости, соответствующей данному моменту времени. При опыте 05-I4 были установлены два датчика измерения средней на конце трубопровода скорости: один в начале, а другой на конце трубопровода.

Абсолютные значения измеряемых величин определяются при использовании тарировочных данных и показаний на осциллограмме. Таким образом, при помощи описанной опытной установки и измерительных систем можно определить средние по живому сечению величины, входящие в формулы для расчета установившегося движения жидкости в трубопроводах.

## Литература

У.Р. Лийв. Измерения мгновенных скоростей в напорном трубопроводе при неустановившемся движении жидкости. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 5I, ВНИИГ, Приборы для гидравлических исследований, "Энергия", I969.

E.Kask, U.Liiv

Experimental Equipment for Unsteady Pulsatile Flow Investigations

Summary

Pulsatile flows in technological hydraulic systems are often characterized by the high degree of acceleration. The paper describes an experimental equipment for pulsatile flow investigations. It consists of the hydraulic flow and measuring systems. With the help of this equipment the mean characteristics of velocity and pressure at every moment of the pulsatile flow can be determined.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 621.82-225:532.55

Э.Г. Каск, У.Р. Лийв

# О РАСЧЕТЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Гидравлический расчет пульсирующего движения обычно основывается на закономерностях жесткого неустановившегося движения, которое в условиях горизонтального трубопровода сводится к уравнению Бернулли с инерционным членом

$$\left(\frac{\Delta p}{\gamma}\right)_D = (h_L)_D + h_i , \qquad (1)$$

при этом $\left(\frac{\Delta p}{\gamma}\right)_D$ – мгновенный пьезометрический напор, измеряемый датчиками давления;

$(h_L)_D$ – мгновенная потеря напора;

$h_i$ – инерционный напор.

Потеря напора определяется по формуле Вейсбаха–Дарси

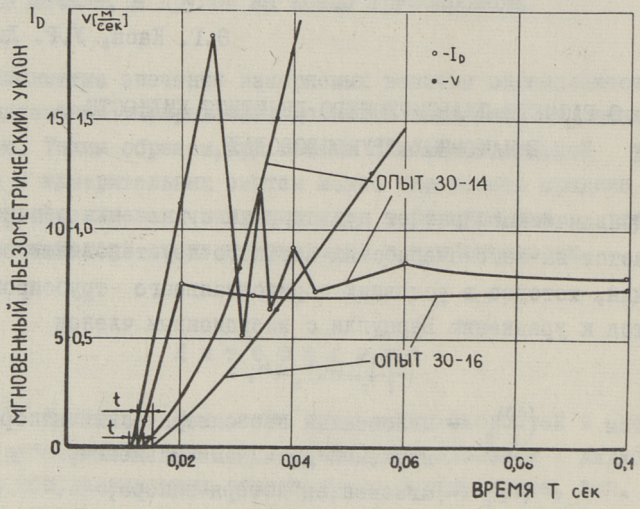
$$(h_L)_D = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}, \qquad (2)$$

учитывая, что коэффициент гидравлического трения $\lambda$ одинаковый как при установившемся, так и при неустановившемся движении жидкости. Инерционный напор определяется без учета влияния распределения скоростей (корректив количества движения $\alpha_0 = 1{,}0$) по зависимости

$$h_i = \frac{L}{g} \frac{dv}{\partial t} . \qquad (3)$$

Однако практика показывает, что опытные данные не согласуются с результатами расчета. С другой стороны, имеется ряд технологических систем, которые требуют более детального определения потерь механической энергии в любой момент времени пульсирующего движения жидкости. Кроме того, при обработке опытных данных выясняется целый ряд обстоятельств, не учитываемых формулой (I).

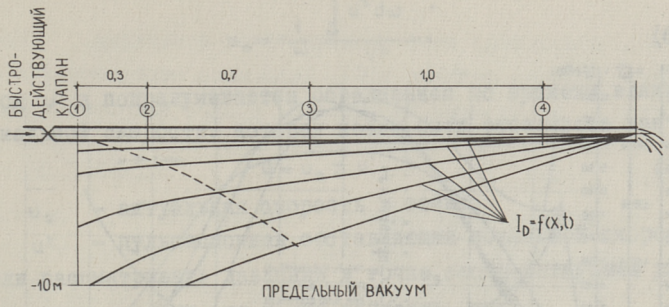
I. При быстром открытии клапана, расположенного в начале исследуемого трубопровода [I], возникает резкое увеличение потенциального напора, которое распространяется вниз со скоростью распространения возмущений С. Спустя некоторое время t , в сечениях трубопровода возникает средняя скорость (фиг. I).




Фиг. 1

В промежутке времени t потеря напора по формуле (2) и инерционный напор (3) равны нулю и формула (I) остается незамкнутой. Кроме того, в зависимости от скорости изменения относительного отверстия клапана ($\frac{a}{a_0}$) нарастание потенциального напора может быть либо сравнительно плавным (опыт 30-I6), либо возникает колебательное изменение давления (опыт 30-I4). Время затухания зависит, очевидно, от градиента давления по времени, а также от характеристик трубопровода.

2. При замедлении потока, после того как клапан прикрылся, поток продолжает двигаться дальше за счет приобретенной кинетической энергии. Давление за клапаном падает до давления насыщенных паров, из жидкости выделяется растворенный воздух, плотность уменьшается. Пьезометрические линии, согласно проведенным опытам, начинают отличаться от прямых линий (фиг.2).




**Фиг. 2**

В таких случаях мгновенный пьезометрический уклон зависит кроме шероховатости также от координаты вдоль оси трубопровода и времени.

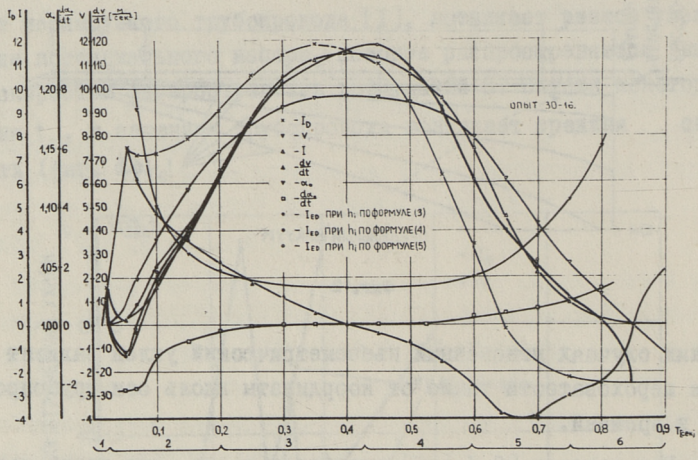
3. Ряд авторов [2,3,4,5] указывает на то, что эпюра распределения скоростей во время неустановившегося движения деформируется и в ходе расчета инерционного напора должен быть введен соответствующий корректив, причем [2,3] предлагают ввести переменный во времени коэффициент $\alpha_0$ в формулу

$$h_i = \alpha_0 \frac{L}{g} \frac{\partial v}{\partial t}, \qquad (4)$$

а [5] определяет инерционный напор как

$$h_i = \frac{L}{g}\left(\alpha_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{2} \frac{d\alpha_0}{\partial t}\right). \qquad (5)$$

Сравнение предложенных формул расчета инерционного напора, а также и других характеристик пульсирующего движения жидкости дано на фиг. 3. Буквами $I_D$ и $I_{e_D}$ обозначены мгновенные пьезометрические и гидравлические уклоны соответственно, линия V показывает изменение во времени средней скорости. Чтобы определить величину $\alpha_0$ по графику, предложенному в [3], сначала для любого расчетного момента определяется параметр $\frac{d}{v^2}\frac{dv}{dt}$. Анализ расчетных точек $I_{e_D}$, которые были вычислены по (I), и $h_i$, вычисленный по (4) и (5), показывает, что в отдельные моменты времени гидравлический уклон отрицательный, что противоречит закону сохранения энергии. Следовательно, для составления полного баланса энергии следует ввести дополнительные члены в формулу (I).




**Фиг. 3**

В случае, если движение возникает из покоя (фиг.3), согласно экспериментальным данным [4] возникает задача, которая описывается по теории потери устойчивости. Первоначальные эпюры распределения скоростей, вслед за клапаном, могут быть такими, что средняя скорость равна еще нулю. Однако на образование эпюры и на потерю устойчивости потребовалось некоторое количество энергии. Жидкость в трубопроводе приводится в движение постепенно по мере того, как происходит деформирование эпюры скоростей во времени и по оси трубопровода.

Если разбить весь процесс на несколько промежутков, указанных на фиг. 3, на оси времени, то вся потенциальная энергия в пределах промежутка I расходуется на преодоление вышеописанного процесса, вызванного сжимаемостью жидкости, а также на преодоление сил трения. Часть энергии, расходуемая при этом, выражается через $h_c$, т.е. напор, затрачиваемый на преодоление сил сжимаемости.

Формула для определения корректива количества движения $\alpha_0$ обычно выражается в следующем виде:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\omega} \frac{\int u^2 d\omega}{v^2}, \qquad (6)$$

где под $u$ и подразумевается осредненная по времени величина локальной скорости, которая может быть определена как

$$u = u_a \pm u', \qquad (7)$$

где $u_a$ – актуальная скорость в точке;

$u'$ – пульсационная составляющая локальной скорости.

Если рассматривать давление в точке, соответствующей данному моменту времени, то можно написать, что

$$p = p_a \pm p'. \qquad (8)$$

Во все расчетные формулы данной статьи входят только осредненные значения характеристик.

Можно полагать, что часть энергии затрачивается на преодоление сил, возникающих за счет пульсационных составляющих. Эта часть энергии выражается в сложной форме (например, гидравлический прыжок). При этом энергия, затрачиваемая на пульсацию, весьма велика.

Следовательно, разбивая рассматриваемый цикл на 6 промежутков, указанных на фиг. 3, получим для первого промежутка

$$\left(\frac{\Delta p}{\gamma}\right)_D = (h_L)_0 + h_c, \qquad (9)$$

т.е. потенциальная энергия расходуется на выведение жидкости из положения равновесия, причем первый член $(h_L)_0$ на правой стороне уравнения (9) характеризует диссипацию энергии, которая появляется за счет течений, возникающих при средней скорости $v = 0$. О природе этих течений было сказано выше.

На втором промежутке добавляется, кроме указанных в (9), член, учитывающий потери на преодоление пульсации $h_s$, а также инерционного напора, и расчетная зависимость получит вид

$$\left(\frac{\Delta p}{\gamma}\right)_D = (h_L)_D + h_c + h_s + h_i. \qquad (10)$$

Лишь на промежутке 3, где влияние открытия затухает, применима "классическая" формула расчета (I).

Во время промежутка времени 4 возникает замедление потока, появляются силы растяжения, плотность жидкости умень-

шается, вследствие чего увеличивается пульсация. Расчет производится по формуле (IO). Сказанное относится и к промежутку 6, на котором наблюдается полное закрытие клапана. В промежутке 5 рекомендуется использовать в качестве расчетной формулу (I).

В заключение можно сказать, что формула (I), позволяющая произвести расчет неустановившегося движения по осредненным характеристикам скорости и давления, действительна только для небольшого промежутка пульсирующего течения. Чтобы точно определить баланс энергии такого течения, следует ввести в расчетные формулы члены, учитывающие структуру турбулентного течения.

## Литература


I. Э.Г. Каск, У.Р. Лийв. Опытная установка для исследования пульсирующих режимов течения жидкости (см. наст. сб., стр. I2I).

2. M.R. Carstens, J.E. Roller. Boundary shear stress in unsteady turbulent pipe flow. Proceedings of the ASCE, February 1959.

3. У.Р. Лийв. Измерение эпюры скоростей в напорном трубопроводе при неустановившемся движении жидкости. Труды ТПИ, серия А, № 2I2, I964.

4. J.M. Aribert, C. Thirrot. Mouvement d'interface instable de petite et grande amplitude entre deux fluides non miscibles. Rev. Roum. Sci. Techn.-Mec. Appl.Tome 15, N° 2.

5. Д.Х. Ройзман. Теоретическое и экспериментальное исследование периодического течения в трубах. Министерство речного флота РСФСР ЛИВТ, I970.

E.Kask, U.Liiv

# The Computation of the Unsteady Pulsatile Flow in Conduits

Summary

When analysing the balance of energy by the mean characteristics of Bernoully equation with the inertia member, it is useful to add the new members which take into account the compressibility of the liquid and the pulsations of the mean characteristics. The limits of use of the formulae are determined in this paper.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 309 1971

УДК 532.135

Ю.Я. Сяэрекыннo, Л.А. Тепакс

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ПРИ НАПОРНОМ ДВИЖЕНИИ МОРСКОГО ИЛА

В связи с задачей полностью механизировать технологический процесс подачи морского ила (лечебной грязи) в грязехозяйстве бальнеологических лечебниц Эстонской ССР, важное значение имеет определение реологического состояния ила и его реологических параметров.

В нашем исследовании [6] рассматривалось движение морского ила в трубе круглого сечения диаметром 27,6 мм. На основе полученных зависимостей гидравлического уклона $i$ от средней скорости $v$ сделано заключение, что морской ил является бингамовским телом и что его движение определяется реологическими параметрами – вязкостью $\eta$ и предельным касательным напряжением $\tau_0$.

В некоторых работах высказывается мнение, что величины реологических параметров зависят от диаметра трубы, что затрудняет использование значений параметров, полученных в лабораторных условиях, для расчета промышленных трубопроводов.

С целью уточнения данного вопроса в настоящей статье приводятся данные о дополнительном исследовании движения морского ила в трубах разных диаметров. Опыты проводились при разных влажностях, что позволило определить зависимость значений реологических параметров от концентрации морского ила. Окончательное доказательство тому, что морской ил яв-

ляется бингамовским телом, дало исследование распределения скоростей в сечении трубы.

## I. Исследование реологических параметров

В гидродинамике дисперсных систем особого внимания требуют вискозиметрические проблемы. Несмотря на многочисленное количество разработанных капиллярных и ротационных вискозиметров результаты измерений показывают, что реологические параметры $\eta$ и $\tau_0$ во многих случаях зависят от типа вискозиметра, от конструкции и размеров прибора, а также от методики измерений.

Причиной такого поведения материала одни считают пристенное скольжение как в ротационных [I2, I6], так и в капиллярных [5, 7] приборах; другие [I] связывают проблему с влиянием центробежных сил на дисперсную фазу (в ротационной вискозиметрии). Существует и теория о функции распределения концентрации твердой фазы по радиусу трубы [I4].

Сравнивая величины $\eta$ и $\tau_0$, полученные при исследовании течения бингамовских дисперсных систем в трубах и вискозиметрах [II,I2], наблюдаются весьма значительные расхождения.

Д. Калдвеллом и Г. Беббитом [I3] был предложен для определения реологических параметров вязкопластичных систем так называемый метод трубы, основанный на теории Бингама и линеаризации уравнения Бакингэма

$$v = \frac{\gamma_i R^2}{8\eta}\left(1 - \frac{4}{3}\frac{r_0}{R} + \frac{1}{3}\frac{r_0^4}{R^4}\right) \qquad (I)$$

с пренебрежением третьего члена.

Этот метод весьма прост, поэтому широко распространен [3, 9, I0, I2, I3, I7]. Однако подробный анализ опытных данных выявляет зависимость величин $\eta$ и $\tau_0$ от диаметра труб. В дискуссии о причинах этого явления одни авторы объясняют их использованием неполного уравнения Бакингэма [3], другие – теорией пристенного скольжения [2, 5, 7] и связанным с

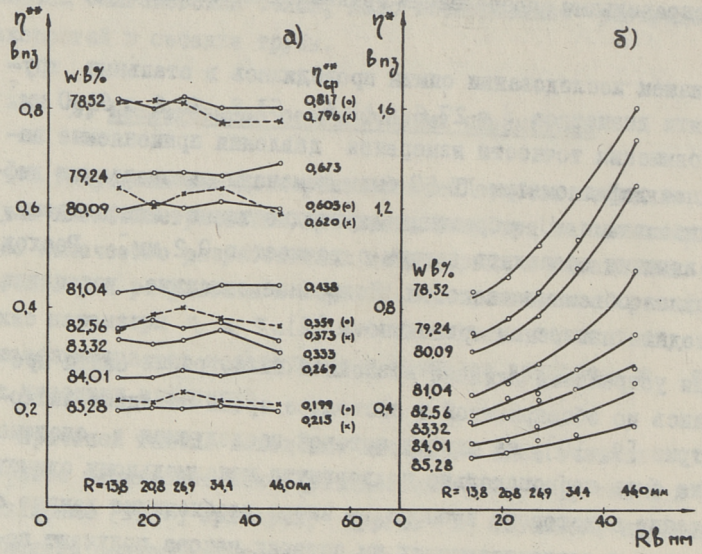
ним неправильным определением градиента на стенке труб [8, I5].

В нашем исследовании опыты проводились в стальных трубах пяти диаметров d = 27,6; 4I,6; 53,8; 68,8 и 92,0 мм. Для повышения точности измерения давления применяемые нами ранее дифманометры ДТ-50 были заменены самодельными дифференциальными U-образными двухжидкостными манометрами, позволяющими проводить замеры с точностью 0,2 мм. Расход измерялся объемным способом. Подробное описание установки и методики измерения приведено в [6].

Для устранения влияния возможной тиксотропии опыты проводились по общепринятой в настоящее время методике вискозиметрии [9, I0], на основе которой исследуемая система должна быть первоначально подвергнута максимальному сдвигу в течение некоторого времени, а затем необходимые данные о скоростях и соответствующих им потерях напора получают последовательным снижением скорости движения.

Характеристики H-Q , т.е. зависимости напора от расхода, снимались в разных сечениях всех упомянутых труб при постоянной температуре и в широком диапазоне (с точки зрения технологического процесса грязелечебниц) изменения влажности (78...85 %) ила. Опытные данные подвергались обработке для получения реологических параметров $\eta$ и $\tau_0$ в виде характеристик i-v с помощью как полного, так и линейного, без третьего члена уравнения Бакингэма (I), используя при этом метод наименьших квадратов. Вычисления проводились на ЭВМ "Минск-22".

В результате такой обработки опытных данных по полной, а также по линеаризованной формуле Бакингэма получена зависимость вязкости от диаметра трубы (фиг. I). Как видно из графика Iб, при линейной аппроксимации опытных данных значения $\eta$ сильно зависят от диаметра труб, причем, чем больше вязкость, тем больше влияние диаметра. Например, при влажности ила W = 78,5 % разница величин $\eta$ , определенных в трубах диаметрами d = 27,6 и 92,0 мм, приблизительно I00%, в то время как при наибольшем в настоящих опытах разбавле-




**Фиг. 1. Зависимости вязкости $\eta$ от радиуса трубы при использовании: а) полного уравнения** Бакингэма; **б) линейного уравнения** Бакингэма; **× – значения $\eta$ по радиусу ядра**

нии морского ила $W = 85{,}3\ \%$ разница не превышает 40 %. Как показывают расчеты, такие же расхождения наблюдаются и для $\tau_0$, но они не так велики (до 25 %).

Из фиг. Iа видно, что никакой определенной зависимости $\eta$ от диаметра труб не наблюдается. Разброс величин $\eta$, определенных по отдельным трубам во всем диапазоне опытов, невелик и не превышает 6,5 %. Этим хорошо подтверждается применимость теории Бингама при движении морского ила в трубах, используемых в промышленных условиях.

Можно считать доказанным, что пренебрежение третьим членом в уравнении Бакингэма при обработке опытных данных может привести к серьезным систематическим ошибкам, превышающим ошибки эксперимента.

Анализ имеющихся в литературе опытных данных показывает, что часто эксперименты проводят с трубами различного диамет-

ра, но в неизменном диапазоне расхода, что в свою очередь приводит с увеличением диаметра труб к уменьшению скорости. На характеристике $i-v$ область, описанная опытами, приближается к началу координат и средний уклон опытной кривой увеличивается. Такая интерпретация опытных данных труб разных диаметров приводит к существенным погрешностям.

Из нашего исследования можно заключить, что для определения реологических параметров бингамовской жидкости следует обрабатывать опытные данные по полному уравнению Бакингэма. Для получения большой точности следует проводить опыты в возможно более широкой области характеристики - предтурбулентной области движения.

Влияние пристенного скольжения в настоящих опытах не обнаружено.

Практическое использование формулы (I) здесь не рассматривается. Отметим, что этому вопросу посвящен целый ряд работ и предложено несколько графических методов, например [I8].

## 2. Влияние влажности

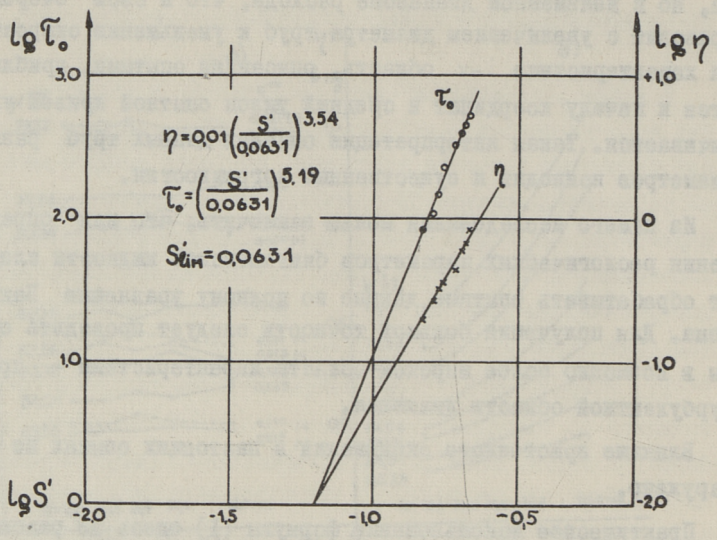
Хорошо известно, что с увеличением концентрации твердой фазы значения реологических параметров увеличиваются. В.Парзонка [I7], изучавший гидродинамику различных гомогенных грунтоводных дисперсных систем (глинистые растворы, разные природные илы), установил, что они относятся к типу бингамовских жидкостей и что реологические параметры $\tau_o$ и $\eta$ хорошо описываются в виде

$$\tau_o = \left(\frac{s'}{s'_{lim}}\right)^i, \quad \eta = 0{,}01\left(\frac{s'}{s'_{lim}}\right)^j, \qquad (2)$$

где $s'$ - весовая концентрация твердой фазы;

$s'_{lim}$ - предельная весовая концентрация твердой фазы, при которой жидкость теряет свои неньютоновские свойства.

Обработка наших опытных данных подтверждает применимость формул (2) для морского ила (фиг. 2). Получены следующие




Фиг. 2. График зависимости $\log(\eta, \tau_0) = f(\log S')$ для морского ила

формулы (при температуре I8 °):

$$\eta = 0{,}01\left(\frac{S'}{0{,}0631}\right)^{3{,}54} \quad \text{и} \quad \tau_0 = \left(\frac{S'}{0{,}0631}\right)^{5{,}19}, \qquad (3)$$

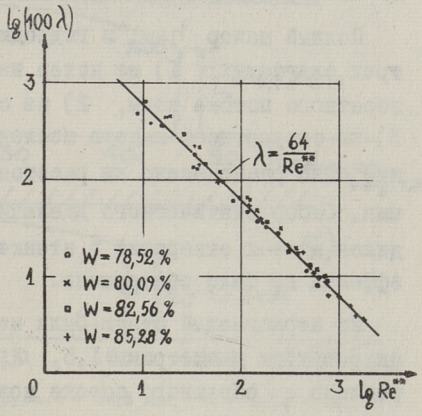
причем значения $S'_{lim} = 0{,}063I$, $i = 5{,}I9$, $j = 3{,}54$ формул (2) определены графически (фиг. 2). Зависимости (3) несколько отличаются от зависимостей, предложенных в [6], описывая точнее опытные данные, поскольку формулы (3) выведены на основе полной формулы Бакингэма.

Пользуясь формулами (3), реологические параметры подсчитываются непосредственно по влагосодержанию ила, причем влагосодержание определяется просто и с достаточной точностью.

На фиг. 3 приведена зависимость $\log(100\lambda) = f(\log Re^{**})$, где $Re^{**} = \frac{\rho v d}{\eta}\left(1 - \frac{4}{3}\frac{r_0}{R} + \frac{1}{3}\frac{r_0^4}{R^4}\right)$.

Для всех опытных точек параметры $\eta$ и $\tau_0$ определены по весовой концентрации твердой фазы из формул (3). Расположение

точек по сравнению с теоретической зависимостью $\lambda = 64/Re^{**}$ можно признать вполне удовлетворительным.




Фиг. 3. Зависимость коэффициента сопротивления $\lambda$ от обобщенного критерия подобия $Re^{**}$

## 3. Распределение скоростей

Согласно теории Бингама поток мелкодисперсной системы рассматривается как состоящий из двух частей: пристеночная градиентная область, где скорость изменяется от нуля до определенного максимального значения, и центральное ядро с постоянной скоростью.

Проведенные экспериментальные исследования охватывают измерения потерь напора, и в этой области имеется богатый экспериментальный материал. Что касается исследований распределения скоростей в потоке бингамовской жидкости, то согласно литературным данным такие исследования практически отсутствуют. С целью проверки теоретических предпосылок в настоящей работе проводилось подробное изучение распределения скоростей.

Всего было снято 75 скоростных эпюр в 5 трубах разного диаметра при четырех влажностях исследуемого морского ила. Так как морской ил содержит волокнистую примесь, то пользоваться трубками типа ВОДГЕО [4,10] нельзя было из-за быстрой закупорки отверстия скоростного напора и обматывания волокон вокруг стержня трубки, расположенного перпендикулярно к оси потока. Поэтому нами разработан новый метод

измерения скоростей при помощи гидродинамической трубки типа Пито с промывающим трубку обратным потоком чистой воды.

Полный напор $h_{общ}$ в гидродинамической трубке состоит из трех слагаемых: I) из потер напора в трубке при движении обратного потока воды, 2) из статического напора $h_{стат}$ и 3) из скоростного напора исследуемой жидкости. Мерное сечение было расположено на расстоянии I8 см от выходного сечения. Отбор статического давления в мерном сечении производился из 4-х отверстий в стенках трубы. Влияния концевого эффекта не было обнаружено.

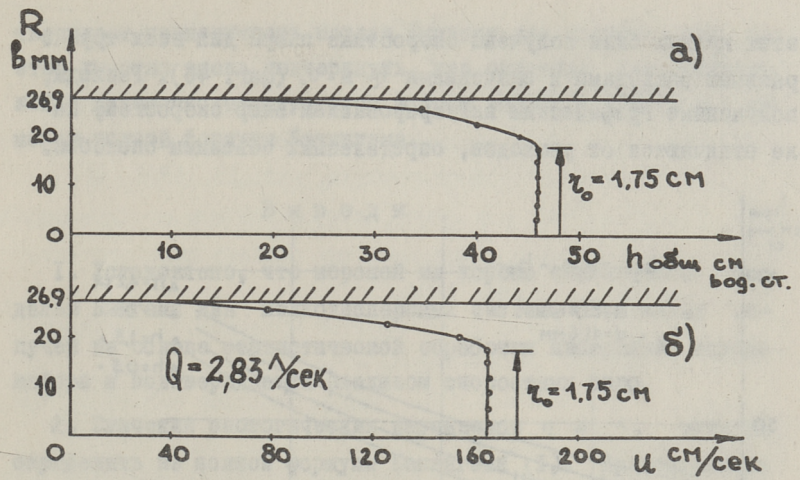
Из нержавеющей стали были изготовлены три гидродинамические трубки диаметрами I,5, 2,0 и 3,0 мм. При постоянном расходе $q$ обратного потока можно ожидать постоянства потери напора за счет гидравлического сопротивления в трубке, и это обстоятельство открывает возможность построения тарировочных кривых для всех использованных трубок.

Первоначально тарировочные кривые строились при движении в трубке чистой воды. Однако эти кривые оказались непригодными для измерения скоростей движения ила. Причиной этого обстоятельства являются, по-видимому, разные условия обтекания гидродинамической трубки: турбулентным потоком воды в одном случае и потоком ила в структурном режиме в другом.

По этой причине тарировка трубок проводилась в потоке ила косвенным способом, сущность которого следующая: при снятии эпюр общего напора в сечении трубы очень четко обнаружилось существование ядра с постоянной скоростью (фиг.4а), причем радиус ядра можно было определить с точностью до 0,5 мм. Наличие ядра свидетельствует о правильности теоретических предпосылок Бингама и о пригодности формул, описывающих распределения скоростей в потоке. Эти формулы легко преобразовать в формулы, не включающие в себя реологические параметры $\eta$ и $\tau_0$:

I) для ядра потока:

$$u_0 = \frac{6V}{\frac{r_0^2}{R^2} + 2\frac{r_0}{R} + 3}, \qquad (4)$$




Фиг. 4. Эпюра скорости в трубе d = 53,8 мм, Q = 2,83 л/сек, ( $\Delta h$ = 2,5 см):
а) по полному напору $h_{общ}$ (относительная эпюра),
б) истинная эпюра скорости, определенная по фиг. 5

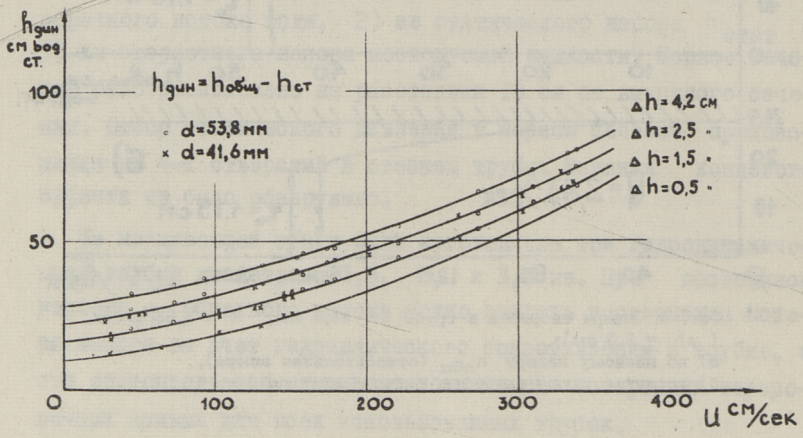
2) для градиентной зоны:

$$u = 4v\,\frac{\frac{1}{2}\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)-\frac{r_0}{R}\left(1-\frac{r}{R}\right)}{1-\frac{4}{3}\frac{r_0}{R}+\frac{1}{3}\frac{r_0^4}{R^4}} = u_0\left[1-\frac{\left(\frac{r}{R}-\frac{r_0}{R}\right)^2}{\left(1-\frac{r_0}{R}\right)^2}\right], \qquad (5)$$

где $r_0$ – радиус ядра;
$r$ – расстояние от оси трубы до рассматриваемой точки градиентной зоны;
$R$ – радиус трубы;
$v$ – средняя скорость, высчитанная по расходу, измеренному объемным способом;
$u_0$ – скорость ядра.

Тарировка трубок проводилась при движении ила в трубах диаметром 41,6 и 53,8 мм при различных расходах ила $Q$ и расходах промывного потока $q$. Последний измерялся с помощью диафрагмы с перепадом давления $\Delta h$ и поддерживался во время измерения постоянным. При постоянном расходе $Q$ и постоянных значениях реологических параметров, скорости в любой точке сечения определялись по формулам (4) и (5). Полученные тарировочные кривые изображены на фиг. 5. С помощью

этих кривых были получены скоростные эпюры для всех труб с разными расходами и значениями $\eta$ и $\tau_0$ (фиг. 4б). Расходы, полученные графическим интегрированием эпюр скоростей, мало отличаются от расходов, определенных объемным способом.




Фиг. 5. Кривые, определяющие распределение скоростей для морского ила ( $d_{\text{Пито}}$ = 2,0 мм)

Как уже упоминалось выше, эпюры скоростей снимались при разных концентрациях твердой фазы, причем во всех случаях определялся радиус ядра. Одновременно замерялся расход ила и гидравлический уклон $i$ .

На основе замеренных величин радиуса ядра определялись реологические параметры из формул

$$\eta = \frac{\gamma d^2 i}{32 v}\left(1 - \frac{4}{3}\frac{r_0}{R} + \frac{1}{3}\frac{r_0^4}{R^4}\right), \quad \tau_c = \frac{\gamma i r_0}{2}. \qquad (6)$$

Полученные значения $\eta$ и $\tau_0$ сравнивались со значениями, полученными при равных концентрациях на основе статистической обработки измерений уклонов и средних скоростей (фиг. 1а). Сравнение величин реологических параметров, полученных двумя способами (по данным измерений потерь напора в трубах и по радиусу ядра потока) показали вполне удовлетворительное совпадение (отклонения в пределах 6 %). Это еще раз под-

тверждает применимость модели Бингама для морского ила. При этом уместно вновь подчеркнуть, что описание кинематической и динамической структуры потока возможно только с помощью полной формулы Бакингэма.

## Выводы

I. Установлено, что морской ил хорошо описывается моделью Бингама для мелкодисперсных систем. Этот вывод получен на основе статистической обработки измерений потерь напора и подтверждается анализом скоростных эпюр.

2. Значения реологических параметров $\eta$ и $\tau_0$ следует определять из полной формулы Бакингэма (I). Пренебрежение третьим членом этой формулы может привести к серьезным погрешностям. Опытные данные рекомендуется обрабатывать по методу наименьших квадратов.

3. Разработан метод измерения распределения скоростей волокносодержащих дисперсных систем с помощью гидродинамической трубки с промывающим обратным потоком воды.

4. Зависимость реологических параметров морского ила от концентрации твердой фазы хорошо описывается формулами (3).

## Литература

I. Л.Д. Гурджинян. Влияние динамических взаимодействий на реологические свойства суспензий глины. Изв. ВУЗ, сер."Нефть и газ", 3, I959, 8.

2. Ю.А. Жданов, В.Ф. Дубовицкий. К вопросу о пристенном скольжении расплава полиэтилена. Хим. машиностроение. Респ. межвед. научно-техн. сб., вып.9,I969, I7.

3. Э.К. Латыпов, Б.С. Филатов. Об аппроксимациях уравнения Бакингэма вязкопластичного течения дисперсных систем. Колл. ж., I, I963, 43.

4. Э.К. Латыпов, Б.С. Филатов. Установка для

гидродинамических исследований с неньютоновскими жидкостями. Изв. ВУЗ, сер. "Нефть и газ", 3, 1962, 85.

5. Г.Д. Розенберг. Об определении бингамовских констант по методу наименьших квадратов из уравнения Бакингэма. Тр. Всес. НИИ буровой техники, вып. 15, 1965, 30.

6. Ю.Я. Сяэрекыннно, Л.А. Тепакс. Исследование реологических и гидравлических свойств морского ила. Тр. ТПИ, серия А, № 298, 1970.

7. Д.М. Толстой. Об эффекте пристенного скольжения дисперсных систем. Колл. ж., 6, 1947, 424.

8. У.Л. Уилкинсон. Неньютоновские жидкости. Изд. "Мир", М., 1964.

9. Б.С. Филатов. Определение реологических свойств суспензий глины в условиях установившегося движения. Колл. ж., 2, 1954, 141.

10. Чжу Мэ. К вопросу о потерях движения в трубах при течении глинистых растворов. Автореферат канд. дисс., М., 1960.

11. А.П. Юфин, Н.Г. Белова, Г.С. Нечаева. Новые опытные данные по гидравлике глинистых растворов. Нефт. хоз., 6, 1959, 26.

12. С.В. Яковлев, Ю.М. Ласков. Перекачка ила и осадков сточных вод. Гос. изд. лит-ры по стр-ву, архитектуре и стр-ным материалам. М., 1961.

13. D.H. Caldwell, H.E. Babbitt. The flow of muds, sludges, and suspensions in circular pipe. Trans.A.I. Ch.E., 37, 1941, 237.

14. S. Iwanami, M. Tachibana. Flow properties of Stable Slurries. Bull. JSME, 50, 1969, 224.

15. Z.D. Jastrzebski. Entrance effects and wall effects in an extrusion rheometer during the flow of concentrated suspensions. Industr. and Engng Chem. Fundamentals, 3, 1967, 445.

16. S.R. Morrison, J.C. Harper. Wall effects in Couette flow of non-newtonian suspensions. Industr. and Engng Chem. Fundamentals, 2, 1965, 176.

17. W. P a r z o n k a. Comportement rheologique des mixtures homogenes sol-eau. Archiwum Hydrotechniki, 2, 1967,297.

18. J.D. P a r e n t. Predicting Flow-Friction Data for Sludges. Chem. and Metallurg. Engng, 51, 1944, 101.

J.Saarekynno, L.Tepaks

## The Study of Sea Sludge Rheological Constants and Velocity Distribution in Pipes

Summary

It is found that the complete nonlinear form of Buckingham equation must be used in determining the sea sludge rheological constants from engineering pipe flow data. The linear approximation of the complete Buckingham equation (the method of Caldwell and Babbitt) is not applicable and leads to erroneous results.

Sea sludge having fibrous particles, the generally known VODGEO tube method is not applicable in determining velocity distribution. A new method for measuring velocity distribution based on the application of the hydrodynamic tube with water flow in it has been worked out by the authors.

From the point of view of engineering practice the comparison of rheological constants obtained by nonlinear Buckingham equation and by the radius of plug has given good results: the divergency of the constants is less than 6 per cent.

On the basis of this study we conclude that the Bingham plastic model provides a good representation of the flow behaviour of sea sludge. The rheological constants are discribed by the equations (2).

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
С Е Р И Я А № 309 1971

УДК 628.I

К.А. Оганесян, М.С. Торгомян

# К АНАЛИЗУ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ БАЛАНСОВ (на примере Армянской ССР)

Интенсивное развитие народного хозяйства потребовало решения проблемы рационального планирования комплексного использования водных ресурсов. Возникла необходимость составления водохозяйственного баланса (в.х.б.) с целью сопоставления наличных водных ресурсов с потребностью в них.

В настоящее время имеются некоторые методические разработки по составлению в.х.б. применительно к различным условиям для отдельных районов, республик, бассейнов рек и т.д. [I, 2, 3, 4].

В зависимости от возникающих задач различают генеральные, перспективные, оперативные и отчетные водохозяйственные балансы, составляемые на перспективу или для текущего планирования.

При составлении в.х.б. необходимо располагать данными о поверхностных и подземных водах, учитывать интересы водопотребителей и водопользователей в количественном и качественном отношениях и увязать требования отдельных участников водохозяйственного комплекса.

Важным и до сих пор нерешенным моментом при составлении в.х.б. является санитарный минимальный расход, оставляемый в реке для разбавления сточных вод.

Существующие в настоящее время методики составления в.х.б. недостаточно учитывают вопросы качества воды, а также инте-

ресы рекреации ( отдых, водный спорт, туризм и т.д.). Первыми попытками в СССР в данном направлении являются работы [5, 6, 7].

Важнейшим вопросом при составлении в.х.б. является надежность обеспечения потребителей водой. В настоящее время эта надежность выражается путем установления расчетной водообеспеченности, численные значения которой зависят от вида потребления, народнохозяйственного значения объекта и т.д.

В практике проектирования значение расчетной обеспеченности принимается: водоснабжение - 90-95-99 %; орошение - 75-80 %; энергетика - 85-95-99 %.

В США при составлении в.х.б. вводится понятие "надежные водные ресурсы", по которым и составляется распределение воды между водопотребителями и водопользователями.

Детализация в.х.б. зависит от требуемой точности, в также важности рассматриваемого района, бассейна, узла и т.д. Особо высокой должна быть степень точности баланса в тех случаях, когда баланс составляется для районов с ограниченными водными ресурсами, т.е. при сопоставлении приходной и расходной частей баланса обнаруживается дефицит. Одним из важнейших компонентов водохозяйственного комплекса является рекреация [8, II].

Исследования, проведенные в США сотрудниками Университета Нью-Мексико, показали, например, что использование воды для создания зон отдыха экономически более выгодно, чем ее потребление в сельском хозяйстве.

В общем виде уравнения в.х.б. можно написать так:

$$\sum_{1}^{n} W_{ест} = \sum_{1}^{m} W_{исп} + \sum_{m}^{n} W_{неисп},$$

где $\sum_{1}^{n} W_{ест}$ - естественный сток, который в свою очередь состоит из следующих компонентов:

$$\sum_{1}^{n} W_{ест} = \sum_{1}^{n} (W_{п} + W_{р} + W_{г}),$$

где $W_{п}$ - поверхностный сток;

$W_р$ – родниковый сток;

$W_г$ – грунтовый сток;

$\sum_{1}^{m} W_{исп}$ – используемая часть стока;

$\sum_{m}^{n} W_{неисп}$ – суммарный неиспользованный сток.

В условиях интенсивного использования водных ресурсов может иметь место условие

$$\sum_{m}^{n} W_{неисп} = 0.$$

Для выяснения соотношения перспективных изменений отдельных водопотребителей в общем комплексе авторами анализируется структура в.х.б. на примере Армянской ССР. Перспективные в.х.б., характеризующие динамику освоения водных ресурсов по пятилеткам, составлены по бассейнам рек Армянской ССР на уровнях 1970, 1975, 1980, 1985 гг.

При составлении этих балансов учтены все мероприятия по регулированию, переброске стока рек и прочие комплексные водохозяйственные мероприятия.

Балансы составлены с учетом качества потребляемой воды. При этом различаются три категории воды: питьевая – для коммунальных нужд населения; техническая – для водоснабжения предприятий (технологические процессы, охлаждение); оросительная – для ирригации.

Как показал анализ составленных перспективных в.х.б., при удовлетворении потребностей народного хозяйства использование стока сильно возрастает, особенно в центральных районах республики, где в 1970 г. оно в среднем составляло 51 %.

Наиболее дефицитным по воде районом в настоящее время является бассейн р. Раздан, где степень использования воды доходит до 100 %. Исходя из этого в качестве примера составлены в.х.б. Севан-Разанского (С-Р) комплекса для двух уровней: 1970 г. и условно – после 1970 г.

При составлении этих балансов учитывались все отрасли народного хозяйства с их требованиями к качеству потребляемой воды.

Важным обстоятельством при составлении в.х.б. является установление безвозвратных потерь. Однако в настоящее время из-за отсутствия четкой методики сделать это довольно трудно. Так, в разработанной СОПС-ом методике размещения производительных сил величину безвозвратных потерь для населенных мест предлагается принимать на 1975 г. - 30 % и на 1980 г. - 20 % от суммарного потребления [9].

В США и ФРГ эта величина равна 5 %, для СССР она принимается равной 10 % от валового водопотребления [10].

В перспективе большие резервы рационального использования водных ресурсов заложены в уменьшении величины безвозвратных потерь за счет изменения технологических процессов.

Учитывая имеющиеся разработки, а также местные климатические условия, при составлении водохозяйственного баланса Севан-Разданского комплекса приняты следующие величины безвозвратных потерь для водопотребителей: коммунальное хозяйство и промышленность - 30 %, ирригация - 70 %, гидроэнергетика и водное благоустройство - 5 %.

Предполагается, что развитие в.х.б. Севан-Разданской системы после 1970 г. пойдет в основном за счет возвратных вод, неиспользованных ресурсов и новых источников. Рассчитаны показатели в.х.б. Севан-Разданской системы в целом и по отдельным бассейнам рек, характеризующие степень использования водных ресурсов.

Коэффициент возврата системы:

$$\alpha_{возв} = \frac{\sum_{1}^{n} W_{возв}}{\sum_{1}^{n} W_{исп}},$$

где $W_{возв}$ - величина возвратного стока;

$W_{исп}$ - используемые ресурсы.

Коэффициент безвозвратных потерь:

$$\alpha_{б/п} = \frac{\sum_{1}^{n} W_{б/п}}{\sum_{1}^{n} W_{исп}}$$

или

$$\alpha_{б/п} = 1 - \alpha_{возв},$$

где $W_{б/п}$ – величина безвозвратных потерь.

Так, для всей Севан-Разданской системы на уровне 1970 г. коэффициенты возвратных потерь соответственно равны 0,52 и 0,48.

В дефицитной по воде Севан-Разданской системе чрезвычайно напряженный в.х.б. ожидается в перспективе для бассейна р. Раздан, где уже в настоящее время все ресурсы полностью используются. Напряженность баланса создает расположенный в бассейне реки г. Ереван с его водоемкой промышленностью.

Если до настоящего времени высококачественные родниковые воды, поступающие в город, покрывали нужды населения в питьевой воде и потребности промышленности, то уже в 1970 г. картина меняется. Для удовлетворения потребности в питьевой воде по Апаранскому Гарнинскому водоводам будет подаваться дополнительно 1600 л/сек воды. После 1975 г. и этого количества недостаточно, покрытие нужд в воде будет производиться за счет артезианских и грунтовых вод Араратской равнины, а также вод реки Раздан и оз. Капуйт-лич. После 1980 г. родниковых вод не хватит на покрытие нужд населения в питьевой воде, и в дополнение будут использованы артезианские воды.

В.х.б. г. Еревана, составляемые для различных уровней развития, показывают динамику роста водопотребности народного хозяйства. Уточнив данные водопотребности и сопоставив их с наличными ресурсами, можно по приведенной последовательности анализа произвести воднобалансовые расчеты для конкретных территорий.

Таким образом, анализ структуры в.х.б. конкретных комплексных систем дает возможность более объективно подойти к вопросу рационального использования водных ресурсов при перспективном планировании развития народного хозяйства.

## Литература


1. В.Т. Турчинович. Методика составления водохозяйственного баланса. В кн. "Исследование поверхностного и подземного стока", изд. "Наука", М., 1967.

2. И.А. Кузнецов. О значении водохозяйственного баланса для рационального использования водных ресурсов. Там же.

3. Н.С. Калачев. Трехступенчатая схема оптимального планирования водохозяйственных систем. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. Вып. 6, Алма-Ата, 1968.

4. И.И. Мечитов, В.Н. Плужников, Л.И.Попов. Водохозяйственный баланс - метод оптимального планирования водных ресурсов. В кн. "Комплексное использование и охрана водных ресурсов", изд. "Наука и техника", Минск, 1968.

5. И.И. Мечитов. Основы составления водохозяйственных балансов и оптимизации распределения водных ресурсов (в районах с широким развитием орошения). Автореферат докторской диссертации, М., 1968.

6. П.Д. Гатилло, В.Н. Плужников, Н.А. Правошинский. Вопросы совместного учета количества и качества водных ресурсов при составлении водохозяйственных балансов. В кг. "Водное хозяйство Белоруссии", Минск, 1965.

7. Х.А. Вельнер. О методике составления схем комплексного использования водных ресурсов с учетом качественных характеристик водоемов. Всесоюзная научно-техническая конференция по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения, Таллин, 1967.

8. Г.Г. Ландсберг, Л.Д. Фишман, Д.Л. Фишер. Ресурсы США в будущем. Изд. "Прогресс", М., 1965.

9. СОПС при Госплане СССР. Общая методика разработки генеральной схемы размещения производительных сил СССР на 1971-1980 гг. Изд. "Экономика", М.,1966.

10. Г.П. К а л и н и н. Проблема глобальной гидрологии. Гидрометиздат. Л., 1968.

11. E. K u i p e r. Water resources development: planning, engineering ... L., 1965.

V.Oganesyan, M.Torgomyan

## An Analysis for Water Economic Balance

Summary

This paper deals with the analysis of methods for drawing up water economic balances originated from their patterns on example of the Armenian S.S.R.

By drawing up perspective plans of national economy, the analysis of the water economy balance pattern enables to make the most efficient use of water resources.

## Содержание

Стр.

Л.Л. Пааль, О.П. Паулус. О теоретических основах работы микросеток при очистке сточных вод. . . . 3

А.М. Айтсам, Э.Б. Кауп. Об определении составляющих кислородного баланса реки на основе суточных измерений растворенного $O_2$ . . . . . 11

Ю.Я. Сяэрекыннo, Л.А. Тепакс. Потери напора при внезапном расширении структурного потока бингамовской жидкости. . . . . 21

Л.Л. Пааль, Б.Г. Казарян. О возможности улучшения процессов продольной диффузии вещества загрязнения в реках. . . . . 31

Б.Г. Казарян. О методике инженерного расчета коэффициента скорости превращения органических веществ в водотоках. . . . . 39

В.А. Сууркаск, М.А. Тутт. О коэффициентах турбулентной диффузии в расчетах смешения сточных вод в водотоках . . . . . 51

А.Я. Кыйв, Л.А. Куйк, Э.Р. Каар. Удаление железа из подземных вод упрощенной аэрацией и фильтрованием. . . . . 57

Х.Х. Лыхмуссаар. Некоторые аспекты аналитического решения полуэмпирического уравнения диффузии 63

Л.Л. Пааль, О.П. Паулус. Применение микрофильтров для первичной очистки хозяйственно-бытовых сточных вод. . . . . 73

Х.А. Мёльдер. А.Л. Острат, Л.Л. Пааль. Исследование некоторых характеристик двухфазных систем на моделях аэрируемых канализационных очистных сооружений. . . . . 81

Х.А. Мёльдер, А.Л. Острат, Л.Л. Пааль. Гидродинамическое моделирование канализационных очистных сооружений при помощи критериев подобия двухфазных систем . . . . . 93

Г.С. Ерет. Моделирование процесса капельной конденсации на ЭВМ. . . . . 99

Л.И. Руга. Электрическое моделирование процесса турбулентной диффузии вещества загрязнения в водотоках . . . . . 109

Э.Г. Каск, У.Р. Лийв. Опытная установка для исследования пульсирующих режимов течения жидкости. . . . . 121

Э.Г. Каск, У.Р. Лийв. О расчетах пульсирующего движения жидкости в напорных трубопроводах . . 125

Ю.Я. Сяэрекыннo, Л.А. Тепакс. Исследование реологических параметров и распределения скоростей при напорном движении морского ила. . . . . 133

К.А. Оганесян, М.С. Торгомян. К анализу водохозяйственных балансов . . . . . 147

СБОРНИК СТАТЕЙ
ПО САНИТАРНОЙ ТЕХНИКЕ УП

Таллинский политехнический институт

Редактор Л. П а а л ь
Техн. ред. Л. Л о о п е р

Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ
23 апреля 1971 г.

---

Сдано в набор 12/У1 1971 г. Подписано к печати 9/1Х 1971 г. Бумага 60х90/16. Печ. л. 9,75 + прил. Уч.-изд. л. 8,0. Тираж 350. МВ-08012. Зак. № 583. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул.Коскла, 2/9. Цена 80 коп.

Цена 80 коп.