ISSN 0136-3549
0203-7902

TALLINNA
POLÜTEHNILISE INSTITUUDI
TOIMETISED
505
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

TPI
'81

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Ep.6.7

505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРИ '81

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.34
532.621

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Санитарная техника ХУ

Таллин 1981

Teaduslik Raamatukogu
ENSV TA
TALLINN
АН ЭССР
Научная библиотека

№ 505
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
УДК 532.54.013.2

Л.Я. Айнола, Т.А. Коппель,
Ю.Ю. Лямп, У.Р. Лийв,
О.О. Ээнсалу

О КОЭФФИЦИЕНТЕ ТРЕНИЯ ДЛЯ ЛАМИНАРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТРУБЕ

В данной работе приведены результаты теоретического и экспериментального определения коэффициента трения для ламинарного нестационарного течения жидкости в трубе. При этом основное внимание уделяется разгону жидкости из состояния покоя.

I. Введение

В работе [I] анализируются возможности применения разных подходов для определения коэффициента трения при расчете мгновенной средней скорости разгонного ламинарного течения. Выясняется, что метод постоянного коэффициента трения или предположение о квазистационарности недооценивают трение и скорость получается больше, чем действительная. Упрощенный математический вариант точного определения мгновенной средней скорости при учете коэффициента трения на основе модели несжимаемой жидкости [2] дает хорошо совпадающие с экспериментом результаты. В работе [I] приведена для разгонного течения зависимость коэффициента местного трения ζ от числа Рейнольдса $\zeta = f(Re)$, наклон этой зависимости больше наклона зависимости $\lambda = f(Re)$ стационарного ламинарного течения и равняется - I,5.

Экспериментальное исследование коэффициента трения при разгоне жидкости из состояния покоя рассматривается в работах [3, 4]. Исследован большой диапазон ускорений

и приведены графики коэффициента местного трения ζ от числа Re. Выясняется, что при разгоне жидкости переход ламинарного течения на турбулентное затягивается и происходит при числах Re, превышающих критическое число Re стационарного течения на два порядка. Показано, что метод квазистационарности и другие приблизительные методы не пригодны.

Обстоятельное исследование о коэффициенте трения при колебаниях ламинарного потока в трубе представлено в монографии [5].

В настоящей работе приведен теоретический вывод коэффициента местного трения ζ и коэффициента сопротивления λ^+ для нестационарного ламинарного течения жидкости в трубе. Расчетные величины коэффициента ζ сопоставляются с соответствующими экспериментальными значениями для разгонного течения жидкости.

Экспериментальная часть работы для определения ζ выполнена на опытной установке и по методике, описываемой в работе [6]. В настоящей работе приводятся экспериментальные данные исследования коэффициента местного трения ζ двух труб с диаметрами $d = 0{,}061$ м и $d = 0{,}0338$ м. Касательное напряжение на стенке τ_0 измерено термоанемометрическими датчиками фирмы "ДИСА" типа 55R46. Тарировка датчиков произведена по методике, описываемой в работе [3].

2. Коэффициент трения ламинарного нестационарного течения

Стационарное равномерное ламинарное движение несжимаемой жидкости описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right). \qquad (2.1)$$

Здесь u – составляющая скорости в осевом направлении;
p – давление;
μ – динамический коэффициент вязкости;
z – продольная координата;
r – радиальная координата.

При интегрировании (2.I) по живому сечению имеем

$$\int_0^{2R} 2\pi \frac{\partial p}{\partial z} r\,dr = \mu \int_0^{2R} 2\pi \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) r\,dr \qquad (2.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 2\frac{\mu}{R}\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=R}, \qquad (2.3)$$

где R – радиус трубы.

Обозначая касательное напряжение

$$\tau_0 = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=R}, \qquad (2.4)$$

подучим условие равновесия сил в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{2}{R}\tau_0 = 0. \qquad (2.5)$$

Принимая теперь разделение согласно [7], коэффициент трения λ выводится из зависимости

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\lambda \rho}{4R} U^2 \qquad (2.6)$$

и коэффициент местного трения ζ из

$$\tau_0 = \frac{\zeta \rho U^2}{8}, \qquad (2.7)$$

где ρ – плотность жидкости.

Следовательно, для стационарного движения из соотношений (2.5) – (2.7) имеем

$$\lambda = \zeta. \qquad (2.8)$$

По аналогии с вышеизложенным найдем значение коэффициентов λ и ζ для нестационарного движения.

В этом случае коэффициент сопротивления, который при этом обозначается через λ^+, служит для определения падения пьезометрического напора в ходе нестационарного течения. Потери энергии, расходуемые на преодоление сил трения, определяются при этом с помощью коэффициента местного трения ζ. По данным работы [6] в условиях разгона жидкости до возникновения турбулентности существует равномерное распределение скоростей и поэтому коэффициент местного трения ζ характеризует действительное физическое явление нестационарности разгонного течения. Нестационарное движение жидкости описывается следующим уравнением

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) - \rho\frac{\partial u}{\partial t}, \qquad (2.9)$$

где t – время.

При интегрировании (2.9) по живому сечению имеем

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{2\mu}{R}\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=R} - \rho\frac{\partial U}{\partial t}, \qquad (2.10)$$

где средняя по живому сечению скорость U определяется как

$$U = \frac{2}{R^2}\int_0^R u r\,dr. \qquad (2.11)$$

Используя соотношение (2.4) выражение (2.10) можно представить в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{2}{R}\tau_0 - \rho\frac{\partial U}{\partial t}. \qquad (2.12)$$

По работе [8] величина τ_0 выражается через среднюю скорость и ускорение в виде:

$$\tau_0 = \frac{4\mu}{R}U + \frac{2\mu}{R}\int_0^t \frac{\partial U(\tau)}{\partial t}W(t-\tau)\,d\tau, \qquad (2.13)$$

где

$$W(t) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{a z_k^2 t}{4}}. \qquad (2.14)$$

В последнем выражении $a = 4\nu/R^2$ и z_k – корни функции Бесселя $J_2(z)$ второго порядка, т.е. $J_2(z_k) = 0$, а ν – коэффициент кинематической вязкости.

В условиях нестационарного движения коэффициента местного трения ζ, определяемый из соотношения (2.7) с учетом равенства (2.13), принимает вид:

$$\zeta = \frac{32\nu}{R}\frac{1}{U} + \frac{16\nu}{R}\frac{1}{U^2}\int_0^t \frac{\partial U(\tau)}{\partial t}W(t-\tau)\,d\tau. \qquad (2.15)$$

Принимая во внимание, что

$$Re = \frac{2UR}{\nu}, \qquad (2.16)$$

соотношение (2.15) можно представить в виде

$$\zeta = \frac{64}{Re} + \frac{32}{Re}\frac{1}{U}\int_0^t \frac{\partial U(\tau)}{\partial t}W(t-\tau)\,d\tau. \qquad (2.17)$$

Необходимо подчеркнуть, что в условиях нестационарного движения жидкости коэффициент местного трения зависит

кроме числа Re и от ускорения $\frac{\partial U}{\partial t}$, еще от радиуса трубы R, коэффициента кинематической вязкости ν и от рассматриваемого момента времени t.

Принимая за основу соотношение (2.6), определяем значение коэффициента сопротивления λ^+. Используя соотношение (2.6), (2.I2) и (2.I3), после некоторых преобразований имеем

$$\lambda^+ = \frac{64}{Re} + \frac{64R}{\nu}\frac{1}{Re^2}\int_0^t \frac{\partial U(\tau)}{\partial t} W(t-\tau) + \frac{16R^3}{Re^2\nu^2}\frac{\partial U}{\partial t}. \qquad (2.I8)$$

Из выражений (2.I7) и (2.I8) вытекает, что

$$\lambda^+ = \zeta + \frac{16R^3}{Re^2\nu^2}\frac{\partial U}{\partial t}. \qquad (2.I9)$$

Из последней зависимости видно, что в условиях нестационарного движения жидкости $\lambda^+ \neq \zeta$. Как видно, при этом разница этих коэффициентов определяется слагаемым, зависящим от Re, R, ν и $\frac{\partial U}{\partial t}$.

Следует подчеркнуть, что вышеприведенные зависимости относятся к несжимаемым задачам. В условиях сжимаемой жидкости исходным является диссипативная модель [9]. Так как для диссипативной модели также действительна зависимость (2.I3), то все вышеприведенные зависимости остаются в силе. Однако, следует иметь в виду, что в этом случае $\tau_0(z,t)$, $U(z,t)$ и $\frac{\partial U(z,t)}{\partial t}$ будут зависеть кроме t и от продольной координаты, соответственно и коэффициенты местного трения $\zeta(z,t,Re,R,\nu,\frac{\partial U}{\partial t})$ и сопротивления $\lambda^+(z,t,Re,R,\nu,\frac{\partial U}{\partial t})$.

3. Разгонное движение жидкости в трубах

Рассмотрим теперь разгон жидкости в трубах из состояния покоя и найдем коэффициенты λ^+ и ζ для этого случая. Обозначая

$$q = -\frac{\partial p}{\partial z}, \qquad (3.I)$$

средняя скорость выражается в виде [5]

$$U = \frac{q_\tau R^2}{8\mu}\left[1 - 32\sum_{k=1}^{\infty}\frac{e^{-\frac{a\lambda_k^2 t}{4}}}{\lambda_k^4}\right] \qquad (3.2)$$

и ускорение в виде

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{4q_\tau}{\rho}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{e^{-\frac{a\lambda_k^2 t}{4}}}{\lambda_k^2}, \qquad (3.3)$$

где λ_k – корни функции Бесселя $J_0(\lambda)$ – т.е. $J_0(\lambda_k) = 0$.

Исходя из этих функций, используя зависимости (2.I7) и (2.I8), можно определить $\lambda^+(t)$ и $\zeta(t)$. Используя зависимости (2.6) и (2.7), можно коэффициенты λ^+ и ζ выразить как функции от числа Re

$$\lambda^+ = \frac{16R^3 q_\tau}{\rho\nu^2 Re^2}, \qquad (3.4)$$

и

$$\zeta = \frac{16R^3}{\nu^2 Re^2}\left(\frac{q_\tau}{8} - \frac{\partial U}{\partial t}\right). \qquad (3.5)$$

На фиг. I на основе численного расчета по зависимостям (3.4) и (3.5) представлены графики $\lg(\lambda q_\tau) = f(\lg\frac{Re}{q_\tau})$ и $\lg(\zeta q_\tau) = f(\lg\frac{Re}{q_\tau})$. При расчете принято, что $\nu = 0{,}983 \times 10^{-6}$ м^2/с и $\rho = 998$ Нс^2/м^4. Величина $q_\tau = 8520$ Н/м^3 соответствует условиям эксперимента, проводимого в целях настоящего исследования. Сплошные линии по расчету соответствуют диаметру трубы d = 0,06I м, а пунктирные линии диаметру d = 0,0338 м. На графике представлены также данные величины $\lg(\zeta q_\tau) = f(\frac{Re}{q_\tau})$, полученные после обработки опытных данных величины касательного напряжения τ_0 неустановившегося движения жидкости в трубах с диаметрами 0,06I и 0,0338 м.

Рассмотрим еще подробнее начало разгонного движения жидкости при малых временах $(t << 1)$.

По работе [8] в этом случае

$$W(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\bar{t}^{-1/2} - \frac{5}{4} + \frac{15}{16\sqrt{\pi}}\bar{t}^{1/2} + \frac{15}{64}\bar{t} +$$

$$+\frac{45}{512\sqrt{\pi}}\bar{t}^{3/2}-\frac{45}{2\cdot 32^2}\bar{t}^{2}, \qquad (3.6)$$

где $\bar{t}=at$.

Обозначая изображение Лапласа для средней скорости U через $\bar{U}$, решение уравнения (2.9) примет вид:

$$\bar{U}=\frac{q}{\rho s^2}\frac{I_2(\sqrt{\frac{s}{\nu}}R)}{I_0(\sqrt{\frac{s}{\nu}}R)}. \qquad (3.7)$$

В случае $z\longrightarrow\infty$ можно воспользоваться асимптотическими разложениями и получить

$$\frac{I_2(\sqrt{\frac{s}{\nu}}R)}{I_0(\sqrt{\frac{s}{\nu}}R)}\approx 1-\frac{2\sqrt{\nu}}{R}\frac{1}{\sqrt{s}}+\frac{\nu}{R^2}\frac{1}{s}+\dots \qquad (3.8)$$

Соответственно

$$\bar{U}=\frac{q}{\rho}\left[\frac{1}{s^2}-\frac{2\sqrt{s}}{R}\frac{1}{s^{5/2}}+\frac{\nu}{R^2}\frac{1}{s^3}+\dots\right]. \qquad (3.9)$$

Применив обратное преобразование (3.9), получим, что средняя скорость U выражается в виде

$$U=\frac{q}{\rho}\left[t-\frac{2\sqrt{\nu}}{R}\frac{4}{3\sqrt{\pi}}t^{3/2}+\frac{1}{2}\frac{\nu}{R^2}t^2+\dots\right]. \qquad (3.10)$$

Соответственно ускорение определяется через

$$\frac{\partial U}{\partial t}=\frac{q}{\rho}\left[1-\frac{4\sqrt{\nu}}{\sqrt{\pi}R}t^{1/2}+\frac{\nu}{R^2}t+\dots\right]. \qquad (3.11)$$

Далее, используя обозначение

$$\bar{t}=\frac{4\nu}{R^2}t, \qquad (3.12)$$

равенства (3.10) и (3.11) преобразуются к виду

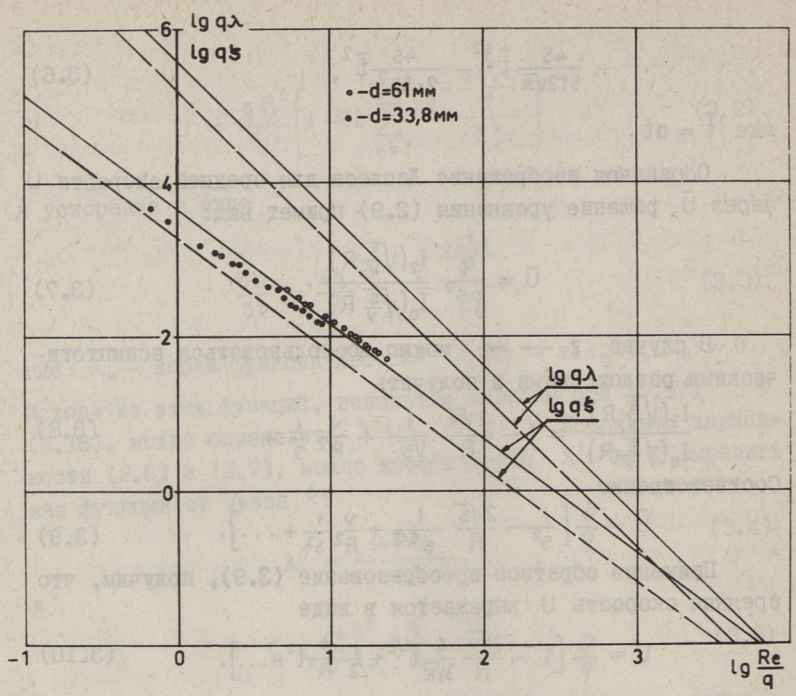
$$U=\frac{qR^2}{4\rho\nu}\left[\bar{t}-\frac{4}{3\sqrt{\pi}}\bar{t}^{3/2}+\frac{1}{8}\bar{t}^{2}+\dots\right] \qquad (3.13)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}=\frac{q}{R}\left[1-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\bar{t}^{-1/2}+\frac{1}{4}\bar{t}+\dots\right]. \qquad (3.14)$$

Находим теперь искомые коэффициенты λ^+ и ζ во время начала разгона жидкости. Исходя из зависимости (2.12) получим

$$q=\frac{2}{R}\tau_0+\rho\frac{\partial U}{\partial t}. \qquad (3.15)$$

При помощи соотношений (3.13) и (3.14) сила трения определяется как



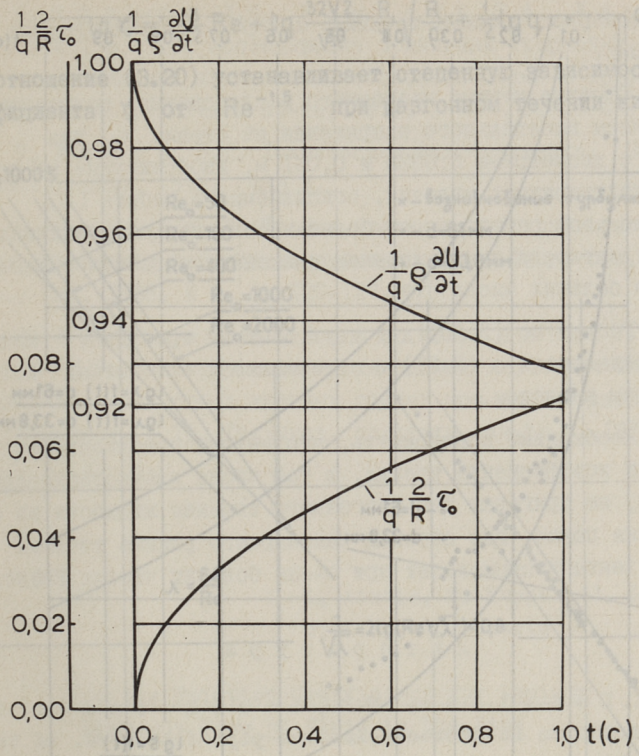
Фиг. 1. $lg(q\lambda) = f(lg\frac{Re}{q})$ и $lg(q\zeta) = f(lg\frac{Re}{q})$.

$$\frac{2}{R}\tau_0 = q - \rho\frac{\partial U}{\partial t} = q\left(\frac{4\sqrt{\nu}}{\sqrt{\pi}R}\sqrt{t} - \frac{\nu}{R^2}t + \ldots\right). \qquad (3.16)$$

Из соотношений (3.14) и (3.16) следует, что по ходу нестационарного процесса сила инерции уменьшается, а сила трения возрастает. Сказанное иллюстрируется на фиг. 2, где приводятся результаты численного расчета величин $\frac{2}{R}\tau_0$ и $\rho\frac{\partial U}{\partial t}$, входящие в зависимость (3.15) и подтверждающие вышеуказанные выводы.

Используя теперь соотношения (3.4), (3.5), (3.13) и (3.14) находим значения коэффициентов сопротивления λ^+ и местного трения ζ в начале движения

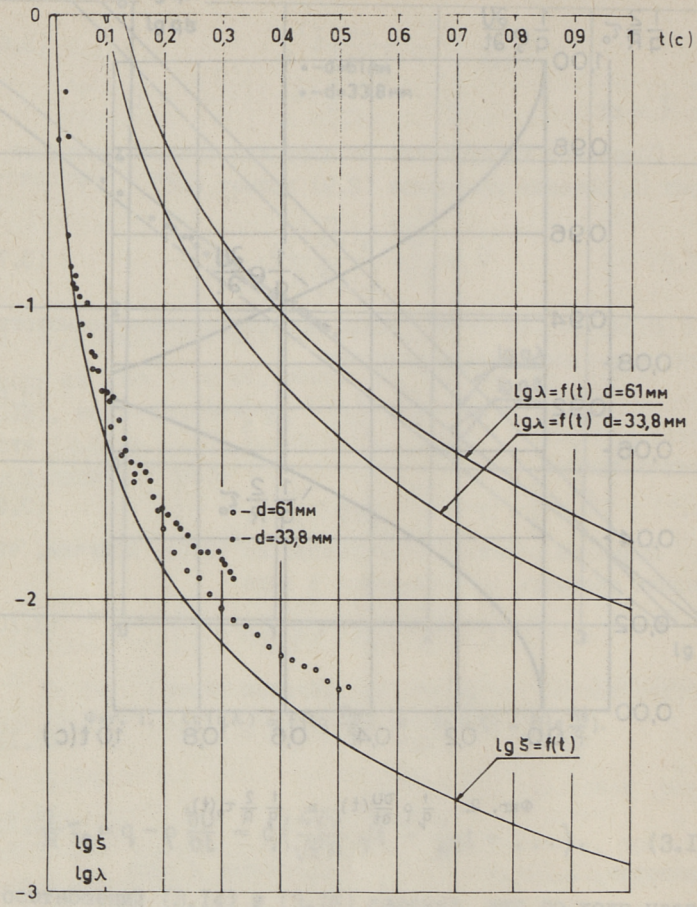
$$\lambda^+ = \frac{4R\rho}{q}\left[\frac{1}{t^2} + \frac{16}{3}\frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{\pi}R}\cdot\frac{1}{t^{3/2}} + \ldots\right] \qquad (3.17)$$



Фиг. 2. $\frac{1}{q}\rho\frac{\partial U}{\partial t}(t)$ и $\frac{1}{q}\frac{2}{R}\tau_0(t)$.

$$\zeta = \frac{4R\rho}{q}\left[\frac{4\sqrt{\nu}}{\sqrt{\pi}R}\frac{1}{t^{3/2}} + \frac{\nu}{R^2}\left(\frac{64}{3\pi}-1\right)\frac{1}{t} - \dots\right]. \qquad (3.18)$$

Используя зависимости (3.17) и (3.18) на фиг. 3 приводятся данные численного расчета $\lg\lambda^+ = f(t)$ и $\lg\zeta = f(t)$. Как видно, для функции $\lg\lambda = f(t)$ расчет дает семейство кривых, причем каждая кривая соответствует разному диаметру трубопровода, в то время как для функции $\lg\zeta = f(t)$ расчетные данные практически сливаются в одну линию. На графике изображены также опытные данные, рассчитанные по измеренным значениям касательного напряжения трения τ_0 для двух труб в ходе разгона жидкости.



Фиг. 3. $q_\nu\lambda = f(t)$ и $q_\nu\zeta = f(t)$.

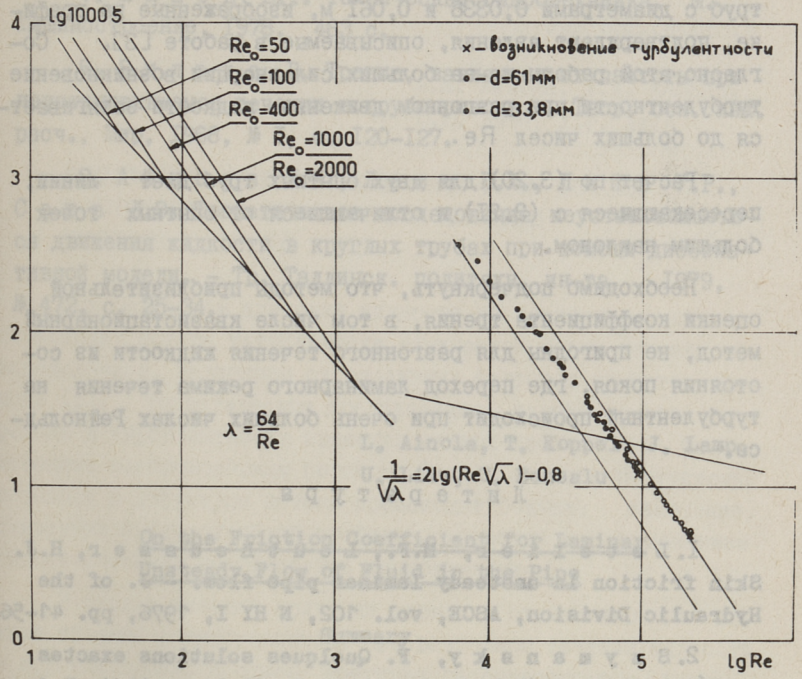
Определяя по первому члену из зависимости (3.I0) величину t и подставляя найденное значение в уравнение (3.I8), находим приближенное выражение для определения коэффициента местного трения в виде

$$\zeta = \frac{32\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{\nu} \sqrt{\frac{q_\nu R}{\rho}} Re^{-3/2} \qquad (3.I9)$$

или

$$\lg \zeta = -\frac{3}{2}\,\mathrm{Re} + \lg \frac{32\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}}\,\frac{R}{\nu}\sqrt{\frac{R}{\rho}} + \frac{1}{2}\lg q. \qquad (3.20)$$

Соотношение (3.20) устанавливает степенную зависимость коэффициента ζ от $\mathrm{Re}^{-1,5}$ при разгонном течении жидкости.



Фиг. 4. $\lg(1000\,\zeta) = f(\lg \mathrm{Re})$.

На фиг. 4 изображены зависимости коэффициента гидравлического трения в условиях ламинарного – $\lambda = 64/\mathrm{Re}$ и турбулентного течений в виде формулы Л. Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\lg(\mathrm{Re}\sqrt{\lambda} - 0{,}8). \qquad (3.21)$$

Линии, пересекающие линию $\lambda = 64/\mathrm{Re}$, представляют опытные данные Летелиера и Лойтхойзера [1] для разгонного движения жидкости. Re_0 характеризует число Рейнольдса

стационарного режима течения, которое устанавливается после разгона.

Опытные данные настоящего исследования, полученные измерением касательного напряжения на стенке τ_0 для двух труб с диаметрами 0,0338 и 0,061 м, изображенные на графике, подтверждают явления, описываемые в работе [3]. Согласно этой работы из-за больших сил инерции возникновение турбулентности при разгонном движении жидкости затягивается до больших чисел Re.

Расчет по (3.20) для двух опытных труб дает линии, пересекающиеся с (3.21) и отличающиеся от опытных точек большим наклоном.

Необходимо подчеркнуть, что методы приблизительной оценки коэффициента трения, в том числе квазистационарный метод, не пригодны для разгонного течения жидкости из состояния покоя, где переход ламинарного режима течения на турбулентный происходит при очень больших числах Рейнольдса.

Литература

I. Letelier, M.F., Leutheusser, H.J. Skin friction in unsteady laminar pipe flow. - J. of the Hydraulic Division, ASCE, vol. 102, N HY I, 1976, pp. 41-56.

2. Szymansky, F. Quelques solutions exactes des équations de'l hydrodynamique de fluides visqueux dans le cas d'un tube cylindrique. - J. de math. pures et appliquées, Série 9, II, 1932, 67-107.

3. Коппель Т.А., Лийв У.Р. Экспериментальное исследование возникновения движения жидкости в трубопроводах. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 6, с. 79-85.

4. Koppel, T.A., Liiv, U.R. An investigation of shear stress on the wall of the pipe at the starting from rest of liquid by the means of a thermoanemometer. - Dynamic Flow Conference (DFC), Abstracts, Marseille, France, 1978, Sept. 11-14, pp. 114.

5. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М., Машиностроение, 1977. 424 с.

6. Айнола Л.Я., Коппель Т.А., Ламп Ю.Ю., Лийв У.Р. Исследование локальных скоростей при разгонном движении жидкости из состояния покоя в трубе.- Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1979, № 472, с. 35–45.

7. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М., Машиностроение, 1978. 463 с.

8. Зильке В. Трение, зависящее от частоты при неустановившемся течении в трубопроводе. - Теор. осн. инж. расч., Мир, 1968, № 1, с. 120–127.

9. Айнола Л.Я., Ламп Ю.Ю., Лийв У.Р., Сарв Л.Э. Теоретическое исследование неустановившегося движения жидкости в круглых трубах при помощи диссипативной модели. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1979, № 472, с. 25–34.

L. Ainola, T. Koppel, J. Lamp,
U. Liiv, O. Eensalu

On the Friction Coefficient for Laminar Unsteady Flow of Fluid in the Pipe

Summary

In this paper the friction coefficients are deduced from the Navier-Stokes equations for the unsteady laminar flow of fluid in the pipe. Based on the theoretical analysis, the relation between the friction coefficient and the Reynolds number is obtained for the accelerated laminar flow in the pipe. A comparison of theoretical and experimental results is given. It is shown that to determine the friction coefficient, exact mathematical methods are required, since the approximate methods including the quasistationary method do not suit.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.54.013.2

Л.Я. Айнола, Т.А. Коппель,
Ю.Ю. Ламп, У.Р. Лийв

О КРИТЕРИЯХ ПЕРЕХОДА ЛАМИНАРНОЙ ФОРМЫ ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНУЮ ПРИ РАЗГОННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

При разгонном движении жидкости из состояния покоя происходит потеря устойчивости ламинарной формы течения при определенном, зависящем от различных факторов моменте времени [1]. Теоретическое предсказание такого момента перехода в турбулентность является важной проблемой в исследованиях нестационарных потоков. Ведь с момента наступления перехода в структуре потока происходят большие изменения, связанные с перестройкой профилей скоростей и с изменением гидравлического коэффициента сопротивления.

В статье выведен критерий перехода от ламинарного режима течения к турбулентному при разгонном течении жидкости в круглой трубе. В основе критерия рассматривается безразмерное расстояние от стенки, связанное с развитием пограничного слоя при разгонном течении жидкости.

1. Состояние проблемы

В цилиндрической трубе проблемы потери устойчивости ламинарного течения теоретически исследованы только в случае стационарных установившихся колебательных движений жидкости.

В работе Янга, Йи [2] рассматривается осциллирующее движение (без расхода) жидкости в трубе и утверждается, что колебательное движение сохраняет устойчивость при всех числах Re. Сарпкая в своей работе [3] исследует устойчивость ламинарного пульсирующего течения с теоретической и с экспериментальной точки зрения. Для теоретических исследова-

ний применяется модель "слоистых течений" [4], в которой градиент давления во времени изменяется по синусоидальному закону. Автор находит связь между параметрами пульсационного движения в "критической" точке, где градиент скорости равняется нулю ($\partial u_x/\partial r = 0$) и имеется точка перегиба профиля ($\partial^2 u_x/\partial r^2 = 0$). Параметрами пульсационного течения являются безразмерная частота пульсаций

$$\Omega = R\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}, \qquad (I.I)$$

и относительная амплитуда пульсаций

$$K = \frac{\Delta U}{U}, \qquad (I.2)$$

где R – радиус трубы;

$\omega = 2\pi/T$ – угловая частота колебаний (T – период колебаний);

ν – кинематический коэффициент вязкости;

U – средняя скорость;

ΔU – амплитуда изменения средней скорости.

Теоретический расчет показывает, что необходимое, но недостаточное для потери устойчивости условие $\partial^2 u_x/\partial r^2 = 0$ выполняется в течение определенной части периода. В экспериментальной части работы устанавливается минимальная длительность этой части периода, во время которой $\partial^2 u_x/\partial r^2 = 0$, необходимая для того, чтобы течение стало неустойчивым.

Сергеев [5] характеризует потерю устойчивости ламинарного пульсационного движения жидкости инерционным критерием, совпадающим с (I.I) и амплитудным критерием:

$$A = 2b\sqrt{\frac{\omega}{t}}, \qquad (I.3)$$

где b – амплитуда пульсации;

t – время.

Экспериментально найдено, что критическое число $A_{кр} = 690–700$ и не зависит от числа Re осредненного движения в диапазоне Re = 0 – 1800.

В работах Меркли, Томана [6] получено $A_{кр} = 400$, Клеймена, Минтона [7] – $A_{кр} = 394$.

Хино, Савомото, Такасу [8] приводят критерий устойчивости в виде числа Re для слоя Стокса:

$$Re_\delta = \frac{U\delta}{\nu}. \qquad (I.4)$$

Толщина слоя Стокса δ при пульсирующем течении определяется по следующему соотношению:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} . \qquad (I.5)$$

Авторы работы [8] исследуют так называемую временную неустойчивость осциллирующего течения в трубе при диапазоне изменения параметра Стокса λ_c = I,35–6,I9. Параметр Стокса определяется соотношением

$$\lambda_c = \frac{R}{\delta} . \qquad (I.6)$$

Экспериментально определено, что переход из ламинарной формы течения в турбулентную наступает при достижении критического числа Рейнольдса для слоя Стокса Re_δ = 550. Возникновение турбулентности совпадает с началом замедляющей фазы течения.

В работах Лойтхойзера [9], Лойтхойзера, Лама [IO, II] исследуется экспериментально влияние дополнительных объемных сил в потоке на устойчивость ламинарных течений в трубах. Действие объемных сил проявляется с возникновением ускорения. Рассматривается влияние инерционных и центробежных сил. Для спирального трубопровода приводится следующая формула расчета критического числа Рейнольдса:

$$Re_{кр} = 2\left(\frac{R}{R_1}\right)^{0,32} \cdot 10^4 , \qquad (I.7)$$

где R_1 – радиус спирали.

Действие инерционных сил в случае разгонного течения жидкости в трубе на $Re_{кр}$ приводится как функция от безразмерного времени T^*:

$$T^* = \frac{g H_0 t_n}{L U_0} , \qquad (I.8)$$

где H_0 – высота напора;
g – ускорение силы тяжести;
t_n – время от начала движения до возникновения турбулентности;
L – длина трубопровода;
U_0 – установившееся значение средней скорости.

В работах Коппеля, Лийва [I, I2] исследуется влияние инерционных сил на устойчивость ламинарного течения. В зависимости от начального ускорения разгонного течения

$dU/dt = 0{,}87 - 11{,}78$ м/с^2 критическое число Рейнольдса – $Re_{кр} = 7{,}8\cdot10^4 - 2{,}35\cdot10^5$.

2. Динамический пограничный слой в цилиндрической трубе

Рассмотрим ламинарное нестационарное движение несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе, которое описывается уравнением [13]:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} - \nu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_x}{\partial r}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \qquad (2.1)$$

где u_x – локальная скорость в направлении оси трубы;
x, r – координаты в направлении оси и радиуса трубы;
t – время;
p – давление;
ρ – плотность жидкости.

Пусть градиент давления зависит от времени линейно:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = A + Bt. \qquad (2.2)$$

Начальным условием для разгонного течения жидкости является

$$u_x = 0 \quad \text{при} \quad t = 0; \qquad (2.3)$$

а граничным условием является условие прилипания жидкости к стенке трубы:

$$u_x = 0 \quad \text{при} \quad r = R. \qquad (2.4)$$

Найдем преобразование Лапласа из уравнения (2.1), учитывая (2.2)

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} - \frac{1}{\nu}p\bar{u}_x - \frac{1}{\nu\rho}\left(\frac{B}{p^2} + \frac{A}{p}\right) = 0, \qquad (2.5)$$

где p – параметр Лапласа.

Образуем новую функцию в виде

$$\bar{\Phi} = \bar{u}_x + \frac{1}{\rho p}\left(\frac{B}{p^2} + \frac{A}{p}\right). \qquad (2.6)$$

Подставляя (2.6) в уравнение (2.5), получаем

$$\frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial x^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} - \frac{1}{\nu}p\bar{\Phi} = 0. \qquad (2.7)$$

Общее решение уравнения (2.7), ограниченное при $r = 0$ (на оси трубы), имеет вид

$$\bar{\Phi} = C(p)\, I_0\left(r\sqrt{\frac{p}{\nu}}\right), \qquad (2.8)$$

где $I_0\left(r\sqrt{\frac{p}{\nu}}\right)$ – модифицированная функция Бесселя.

Пользуясь граничным условием (2.4) для соотношения (2.8) и соотношением (2.6), получим решение уравнения (2.5) в следующем виде:

$$\bar{u}_x = \frac{I_0\left(r\sqrt{\frac{p}{\nu}}\right) - I_0\left(R\sqrt{\frac{p}{\nu}}\right)}{I_0\left(R\sqrt{\frac{p}{\nu}}\right)} \frac{1}{\rho p}\left(\frac{B}{p^2} + \frac{A}{p}\right). \qquad (2.9)$$

Ограничимся рассмотрением решения задачи при малых временах. Соответствующее решение получим, если найдем асимптотическое разложение функции Бесселя при $z \to \infty$. При $z \to \infty$ действительно разложение [I4]:

$$I_0(z) = \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}}\left[1 + O\left(\frac{1}{z}\right)\right]. \qquad (2.10)$$

Пользуясь разложением (2.10), решение (2.9) можно преобразовать в следующий вид:

$$\bar{u}_x = \left[\sqrt{\frac{R}{r}}\, e^{(r-R)\sqrt{\frac{p}{\nu}}} - 1\right] \frac{1}{\rho p}\left(\frac{B}{p^2} + \frac{A}{p}\right). \qquad (2.11)$$

Для нахождения оригинала уравнения (2.11) воспользуемся следующей формулой [I5]:

$$\frac{1}{p^{1+\frac{n}{2}}} e^{-\alpha\sqrt{p}} \doteq (4t)^{\frac{n}{2}}\, i^n \operatorname{erfc}\frac{\alpha}{2\sqrt{t}}, \qquad (2.12)$$

при $n = 0, 1, 2, \ldots$ и $\alpha \geqslant 0$

где $i^n \operatorname{erfc} z = \int_z^\infty i^{n-1} \operatorname{erfc} t\, dt$.

Имеем

$$u_x = \frac{1}{\rho}\sqrt{\frac{R}{r}}\, t\left\{Bt\left[\frac{(R-r)^4}{3\cdot 2^5(\nu t)^2} + \frac{(R-r)^2}{2^3\nu t} + \frac{1}{2^3}\right] + A\left[1 + \frac{(R-r)^2}{2\nu t}\right]\right\} \times$$

$$\times \operatorname{erfc}\frac{R-r}{2\sqrt{\nu t}} - \frac{1}{\rho}\sqrt{\frac{R}{r}}\, t\left\{Bt\left[\frac{(R-r)^3}{3\cdot 2^4(\nu t)^{1,5}} + \frac{5(R-r)}{3\cdot 2^3(\nu t)^{0,5}}\right] + \right.$$

$$\left. + A\,\frac{R-r}{(\nu t)^{0,5}}\right\} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}}\, e^{-\frac{(R-r)^2}{4\nu t}} - \frac{t}{\rho}\left(\frac{Bt}{2} + A\right). \qquad (2.13)$$

Введем новую переменную

$$\beta = \frac{\delta}{2\sqrt{\nu t}}, \qquad (2.14)$$

где $\delta = R - r$.

Тогда выражение (2.13) принимает вид

$$u_x = \frac{t}{\rho}\left\{\sqrt{\frac{R}{r}}\left[Bt\left(\frac{\beta^4}{6}+\frac{\beta^2}{2}+\frac{1}{8}\right)+A\left(1+2\beta^2\right)\right]\times erfc\beta - \right.$$

$$\left. -\frac{1}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{R}{r}}\left[Bt\left(\frac{\beta^3}{6}+\frac{5\beta}{12}\right)+2A\beta\right]e^{-\beta^2}-\frac{Bt}{2}-A\right\}. \qquad (2.15)$$

В случае, когда перепад давления на трубе во время разгона жидкости остается постоянным, т.е. B = 0, из выражения (2.15) получается

$$u_x = A\frac{t}{\rho}\left\{\sqrt{\frac{R}{r}}\left[\left(1+2\beta^2\right)erfc\beta-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\beta e^{-\beta^2}\right]-1\right\}. \qquad (2.16)$$

Определяем теперь толщину пограничного слоя, как расстояние от стенки, на которой локальная скорость отличается от скорости вне пограничного слоя не больше чем на I %. Для этого из соотношения (2.16) получается уравнение

$$\sqrt{\frac{1}{1-\frac{\delta}{R}}}\left[\left(1+2\beta^2\right)erfc\beta_0-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\beta_0 e^{-\beta_0^2}\right]=0{,}01. \qquad (2.17)$$

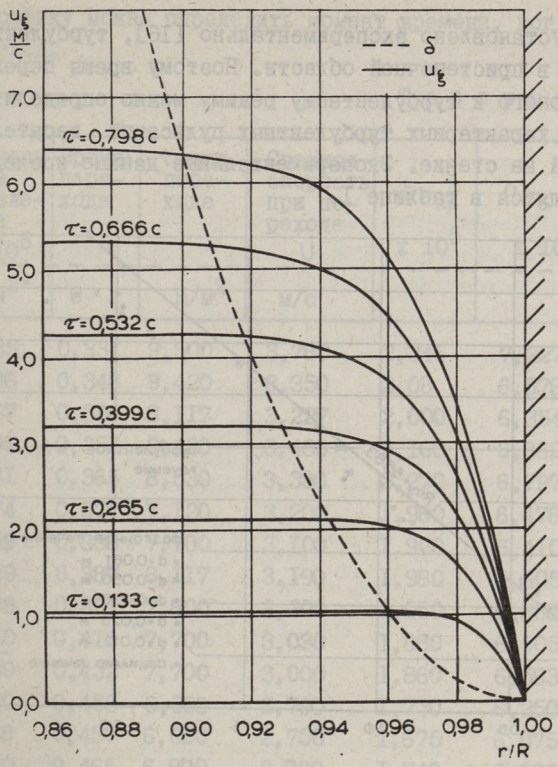
При данных R и ν решение этого уравнения дает толщину пограничного слоя как функцию от времени $\delta=\delta(t)$. Приблизительно можно воспользоваться следующей формулой:

$$\delta = 3{,}3\sqrt{\nu t}. \qquad (2.18)$$

На фиг. I приведены профили локальных скоростей в пристеночной области в разные моменты времени и рост толщины пограничного слоя во времени разгонного ламинарного течения в трубе. Экспериментальные данные о существовании подобного рода распределения продольной скорости до возникновения турбулентности при разгонном течении в трубе приводятся в работе [I6].

3. Критерий перехода при разгонном движении

В работах [5, 8] переход от ламинарного режима течения к турбулентному связывается с критической толщиной слоя Стокса (пограничного слоя). Критерием перехода является число Рейнольдса для слоя Стокса (I.4). Экспериментальные данные в работе [8] представляются на плоскости $\lambda_c = f(Re_{кр})$, где параметр Стокса λ_c вычисляется по формуле (I.6), а $Re_{кр}=2UR/\nu$ является критическим числом Рейнольдса, при котором ламинарное течение становится неустойчивым. Поль-



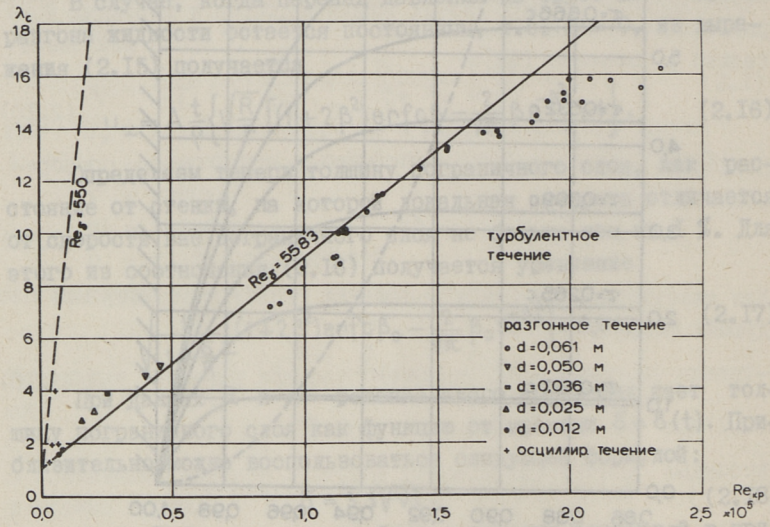
Фиг. 1. Распределение локальных скоростей в разные моменты времени.

ьуясь уравнением (2.I8) для расчета толщины пограничного слоя, вычисляем параметр Стокса по следующей формуле:

$$\lambda_c = \frac{R}{3{,}3\sqrt{\nu t}} \cdot \qquad (3.I)$$

Экспериментальная проверка приведенного критерия для ламинарного разгонного течения была проведена в лаборатории гидравлики Таллинского политехнического института. Описание опытной установки и методики проведения опытов можно найти в работе [I]. Исследования проведены на трубопроводе, диаметр которого равен 6I мм и длина – I9,35 м. Для определения момента возникновения турбулентности использовался термоанемометрический датчик касательного напряжения фирмы "ДИСА" типа 55R46 с измерительной аппаратурой 55MOI.

Как установлено экспериментально [I6], турбулентность возникает в пристеночной области. Поэтому время перехода от ламинарного к турбулентному режиму можно определить по появлению характерных турбулентных пульсаций касательных напряжений на стенке. Экспериментальные данные исследований приводятся в таблице I.



Фиг. 2. Параметр Стокса в зависимости от критического числа Рейнольдса.

На фиг. 2 приводятся экспериментальные данные потери устойчивости осциллирующего [8] и разгонного движения жидкости в круглой трубе на плоскости $\lambda_c = f(Re_{кр})$.

По данным таблицы I рассчитан параметр Стокса в момент возникновения турбулентности. Для осциллирующего течения установлено число $Re_\delta = 550$, для разгонного $Re_\delta = 5583$. Критическое число Re_δ определено на фиг. 2 как прямая, проходящая через точку $\lambda_c = 1$ и являющаяся касательной к экспериментальным данным таким образом, чтобы все точки перехода оказались справа от этой прямой. Прямая $Re_\delta = 5583$ разделяет плоскость $\lambda_c = f(Re_{кр})$ на области ламинарного и турбулентного течения. Если известна зависимость средней скорости от времени во время разгонного течения, то по

этому графику можно определить момент времени, когда наступит переход.

Таблица I

№ опыта	Начальное давление $p \times 10^5$ Н/м^2	Время перехода t_n С	τ_θ при переходе Н/м^2	Средняя скорость при переходе U м/с	$Re_{кр} \times 10^5$	$Re_\delta \times 10^3$	$\eta_к \times 10^2$
I	2,35	0,33I	9,500	3,780	2,345	7,227	I,868
2	I,96	0,348	9,420	3,350	2,08	6,578	I,908
3	I,97	0,350	8,II7	3,227	2,000	6,354	I,776
4	I,96	0,35I	9,420	3,480	2,I60	6,862	I,9I6
5	I,8I	0,365	8,530	3,380	2,270	6,797	I,859
6	I,74	0,370	7,I20	3,200	I,980	6,478	I,7I0
7	I,59	0,386	7,700	3,I00	I,920	6,4I0	I,8I6
8	I,59	0,387	8,II7	3,I90	I,980	6,605	I,867
9	I,59	0,39I	7,800	3,300	2,050	6,868	I,840
I0	I,40	0,4I6	7,700	3,030	I,880	6,505	I,886
II	I,39	0,432	7,700	3,000	I,860	6,563	I,922
I2	I,20	0,453	6,500	2,790	I,730	6,250	I,808
I3	I,I8	0,457	6,000	2,700	I,675	6,075	I,745
I4	I,20	0,465	6,870	2,803	I,740	6,362	I,883
I5	0,98	0,498	5,800	2,477	I,538	5,8I8	I,79I
I6	0,98	0,503	5,475	2,477	I,538	5,847	I,748
I7	0,824	0,567	5,I50	2,3I4	I,437	5,799	I,800
I8	0,599	0,663	4,267	2,086	I,293	5,653	I,772
I9	0,598	0,667	4,350	2,054	I,275	5,583	I,795
20	0,540	0,744	3,600	I,990	I,235	5,7I3	I,724
2I	0,44I	0,858	3,330	I,860	I,I54	5,734	I,78I
22	0,402	0,864	3,600	I,850	I,I50	5,723	I,858
23	0,402	0,870	3,000	I,820	I,I30	5,650	I,702
24	0,4I2	0,87I	3,300	I,850	I,I50	5,747	I,786
25	0,40I	0,87I	3,300	I,870	I,I60	5,809	I,786
26	0,3I3	I,055	2,900	I,800	I,II7	6,I54	I,843
27	0,3I3	I,064	2,750	I,790	I,II0	6,I46	I,802
28	0,304	I,II7	2,600	I,830	I,I36	6,437	I,796
29	0,284	I,I62	2,600	I,600	0,993	5,740	I,83I

I	2	3	4	5	6	7	8
30	0,206	I,450	2,200	I,520	0,944	6,09I	I,882
3I	0,I86	I,627	2,000	I,460	0,906	6,I98	I,900
32	0,I86	I,662	I,8I3	I,402	0,868	6,0I5	I,829

При больших критических числах $Re_{кр}$ опытные точки заметно отклоняются от прямой $Re_{\delta} = 5583$, это значит, что переход происходит при большей толщине слоя Стокса, чем предсказано (момент перехода запаздывает).

Для сравнения на фиг. 2 нанесены опытные данные пересчитанные из работы [I0] для четырех различных диаметров трубопровода. В работе [I0] момент наступления перехода определяется по возникновению колебаний струи, вытекающей из конца трубопровода. Кроме того, время от начала разгона жидкости до перехода от ламинарного к турбулентному режиму приведено в безразмерном масштабе (I.8), поэтому пересчитанные точки оказываются слева от прямой $Re_{\delta} = 5583$.

В качестве второго критерия рассматриваем безразмерный параметр, определяющий расстояние от стенки

$$\eta = \frac{u_* \delta}{\nu}, \qquad (3.2)$$

где $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ - динамическая скорость;

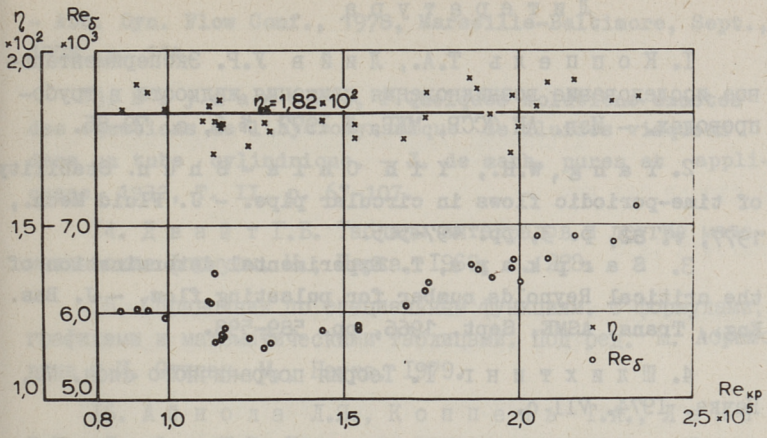
τ_0 - касательное напряжение на стенке.

Пользуясь формулой (2.I8) для расчета толщины пограничного слоя и выражением для динамической скорости, получим:

$$\eta = 3{,}3\sqrt{\frac{\tau_0 t}{\mu}}, \qquad (3.3)$$

где $\mu = \nu\rho$.

Подставляя в формулу (3.3) реальное время наступления перехода t_n и значения касательного напряжения на стенке τ_0 в тот самый момент, получаем критическое безразмерное расстояние от стенки $\eta_к$. По опытным данным, приведенным в табл. I, построены функции $\eta_к = f(Re_{кр})$ и $Re_{\delta} = f(Re_{кр})$ на фиг. 3. Оказывается, что в диапазоне $Re_{кр} = (0{,}86\text{–}2{,}35)\cdot 10^5$ $\eta_к$ колеблется вокруг среднего значения $\eta_к = I82$. Это значит, что потеря устойчивости ламинарного разгонного течения происходит на постоянном безразмерном расстоянии от стенки.



Фиг. 3. Критерий возникновения турбулентности в зависимости от критического числа Рейнольдса.

Находим из (3.2) и (3.3) безразмерное время наступления перехода, приведенное в безразмерную форму т.н. параметрами стенки u_* и ν :

$$T_n = \frac{t_n u_*^2}{\nu} = \left(\frac{\eta_к}{3{,}3}\right)^2 = \text{const}. \qquad (3.4)$$

Приведенная формула является доказательством того, что потеря устойчивости ламинарных разгонных течений в трубах связана с динамикой слоя Стокса.

Литература

I. Коппель Т.А., Лийв У.Р. Экспериментальное исследование возникновения движения жидкости в трубопроводах. - Изв. АН СССР, МЖГ, № 1977, № 6, с. 79-85.

2. Yang, W.H., Yih Chia-Shun. Stability of time-periodic flows in circular pipe. - J. Fluid Mech., 1977, v. 82, p. 3, pp. 497-505.

3. Sarpkaya, T. Experimental determination of the critical Reynolds number for pulsating flow. - J. Bas. Eng., Trans. ASME, Sept. 1966, pp. 589-598.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1974. 711 с.

5. Сергеев С.И. Свойство потоков жидкости, пульсирующей по трубам. Хим. и нефт. маш. стр. 1969, № 6, с. 14-17.

6. Merkli, P., Thomann, H. Transition to turbulence in oscillating pipe flow. - J. Fluid Mech., v. 68, p. 3, pp. 567-575.

7. Clamen, M., Minton, P. An experimental investigation of flow in a oscillating pipe. - J. Fluid Mech., 1977, v. 81, p. 3, pp. 421-431.

8. Hino, M., Sawamoto, M., Takasu, S. Experiments on transition to turbulence in a oscillatory pipe flow. - J. Fluid Mech. 1976, v. 75 p. 2, pp. 193-207.

9. Leutheusser, H.J. Problems of accelerated fluid motion. - Proc. 17th Congr. IAHR, Baden-Baden, Germany, 1977, v. 6, pp. 247-252.

10. Leutheusser, H.J., Lam, K.W. Laminar-to-turbulent transition in accelerated fluid motion. - Proc. 17th Congr. IAHR, Baden-Baden, Germany, 1977, v. 2, pp. 343-350.

11. Leutheusser, H.J., Lam, K.W. Flow instability in accelerated fluid motion. CANCAM'77. Proc. 6th Can. Congr. Appl. Mech., v. 2. Vancouver, 1977, pp. 679-680.

12. Koppel, T.A., Liiv, U.R. Investigation of shear stress on the wall of the pipe at the starting from rest of liquid by the means of a thermoanemometer.

- Abs. Dyn. Flow Conf., 1978, Marseille-Baltimore, Sept., 1978, p. 114.

13. S z y m a n s k i, P.Quelques solutions exactes des equations de l'hydrodynamique de fluides visqueux dans un tube cylindrique. - J. de math. pures et appliquees, 1932, T. II, p. 67-107.

I4. Д в а й т Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М., Наука, I969, с. 228.

I5. Справочник по специальным функциям. С формулами, графиками и математическими таблицами. Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган. М., Наука, I979.

I6. А й н о л а Л.Я., К о п п е л ь Т.А., Л а м п Ю.Ю., Л и й в У.Р. Исследование локальных скоростей при разгонном движении жидкости из состояния покоя в трубе. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, I979, № 472, с. 35-44.

L. Ainola, T. Koppel, J. Lamp,
U. Liiv

On the Criteria of the Transition from Laminar to Turbulent in Starting Pipe Flow

Summary

In this paper the starting flow of the incompressible liquid in the round pipes is studied on the basis of linearized equations of Navier-Stokes. Using the operational calculus for short time intervals, an exact solution for axial velocity distribution is determined. It is indicated that during the starting period the flow remains approximately automodelous until the turbulence is generated. The criterion describing transition from laminar to turbulence regime is found depending on the critical thickness of the boundary layer. When the initial accelerations range from 0.87 to 11.78 m/s^2, the experimental data are in good accordance with the given criterion.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.54.013.2

Э.А. Руустал

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

Решение конкретных задач о неустановившихся течениях сжимаемой жидкости в трубе при помощи одномерной модели, построенной на основе гипотезы квазистационарности течения, не представляет особых математических трудностей. Решения для ряда таких задач приведены в монографиях [1-3] и в многочисленных статьях.

Как показывают результаты работы [4], одномерная модель плохо описывает неустановившееся движение жидкости с большой вязкостью в задачах распространения импульса давления и гидравлического удара в начальной стадии движения. Но хорошее совпадение между результатами эксперимента и расчета получается при использовании более сложной диссипативной модели [4, 5]. В то же время в работе [5] показано, что при жидкости с малой вязкостью теория Жуковского дает прекрасное совпадение с экспериментом в начале движения. Поэтому можно предполагать, что одномерная модель может быть применена при изучении неустановившегося течения в случае жидкости с малой вязкостью.

Чтобы исследовать вопрос о пределах применимости одномерной модели, в настоящей работе на основе этой модели решается задача о неустановившемся течении в случае, когда в одном конце трубы давление является постоянным, а в другом конце быстро падает.

Выводится точное решение для нескольких первых отражений волн давления и скорости, пользуясь операционным методом и численным методом вычисления интегралов. Полученные результаты сопоставляются с теоретическими результатами, полученными при помощи диссипативной модели.

I. Аналитическое решение задачи

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial w(\xi,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(\xi,t)}{\partial \xi} + \alpha w(\xi,t) = 0 \\ &\frac{\partial w(\xi,t)}{\partial \xi} + \frac{\partial q(\xi,t)}{\partial t} = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (I.I)$$

при следующих начальных и граничных условиях

$$w(\xi,0) = 0\,, \quad q(\xi,0) = q_0; \qquad (I.2)$$

$$q(0,t) = q_0\,, \qquad (I.3)$$

$$q(1,t) = q_0\left(1 - \frac{t}{\tau'}\right)\eta(t) + \frac{q_0}{\tau'}(t-\tau')\,\eta(t-\tau')\,,$$

где $w(\xi,t)$ – безразмерная средняя скорость течения;
$q(\xi,t)$ – безразмерное давление;
$\eta(t)$ – функция Хевисайда.

Решаем задачу (I.I) – (I.3) операционным методом.

Если обозначить

$$F(\xi,s) = \int_0^\infty f(\xi,t)\,e^{-st}\,dt \qquad (I.4)$$

и провести преобразование Лапласа по времени уравнения (I.I) с учетом условий (I.2), то получим систему:

$$\left.\begin{aligned} &sW(\xi,s) + \frac{dQ(\xi,s)}{d\xi} + \alpha W(\xi,s) = 0 \\ &\frac{dW(\xi,s)}{d\xi} + sQ(\xi,s) - q_0 = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (I.5)$$

Применяя преобразование Лапласа к граничным условиям (I.3), получаются

$$Q(0,s) = \frac{q_0}{s}\,, \quad Q(1,s) = q_0\left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s^2\tau'}\left(1 - e^{-\tau' s}\right)\right]. \qquad (I.6)$$

Решение системы (I.5) при граничных условиях (I.6) имеет вид

$$W(\xi,s) = \frac{q_0\left(1 - e^{-\tau' s}\right)\cdot ch\left(\sqrt{s^2+\alpha s}\cdot\xi\right)}{\tau'\cdot s\cdot\sqrt{s^2+\alpha s}\cdot sh\sqrt{s^2+\alpha s}}\,, \qquad (I.7)$$

$$Q(\xi,s) = \frac{q_0}{s} - \frac{q_0(1-e^{-\tau' s})\cdot sh\left(\sqrt{s^2+\alpha s}\cdot\xi\right)}{\tau'\cdot s^2\cdot sh\sqrt{s^2+\alpha s}} \qquad (I.8)$$

Известно [6], что если существует $\lim_{t\to\infty} f(t)$, то

$$\lim_{t\to\infty} f(t) = \lim_{s\to 0} sF(s). \qquad (I.9)$$

Если применить эту теорему к величинам (I.7) и (I.8), получаются

$$\lim_{t\to\infty} w(\xi,t) = \lim_{s\to 0} sW(\xi,s) = \frac{q_0}{\alpha}, \qquad (I.10)$$

$$\lim_{t\to\infty} q(\xi,t) = \lim_{s\to 0} sQ(\xi,s) = q_0(1-\xi). \qquad (I.11)$$

Определяем теперь функции $w(\xi,t)$ и $q(\xi,t)$. Разлагая изображения $W(\xi,s)$ в ряд, имеем

$$W(\xi,s) = \frac{q_0(1-e^{-\tau' s})}{\tau'\cdot s}\cdot\left[\sum_{i=0}^{\infty}\frac{e^{-(2i+1-\xi)\sqrt{s^2+\alpha s}}}{\sqrt{s^2+\alpha s}} + \sum_{j=0}^{\infty}\frac{e^{-(2j+1+\xi)\sqrt{s^2+\alpha s}}}{\sqrt{s^2+\alpha s}}\right]. \qquad (I.12)$$

Можно доказать, что изображение (I.12) может быть переведено в пространство оригиналов почленным преобразованием [6].

Так как [7]

$$\frac{e^{-x\sqrt{s^2+\alpha s}}}{\sqrt{s^2+\alpha s}} \doteqdot e^{-\frac{\alpha}{2}t} I_0\left(\frac{\alpha}{2}\sqrt{t^2-x^2}\right)\eta(t-x), \qquad (I.13)$$

то

$$\frac{1-e^{-\tau' s}}{s}\cdot\frac{e^{-(2i+1-\xi)\sqrt{s^2+\alpha s}}}{\sqrt{s^2+\alpha s}} \doteqdot \qquad (I.14)$$

$$\doteqdot\left[\eta(t)-\eta(t-\tau')\right] * \left[e^{-\frac{\alpha}{2}t} I_0\left(\frac{\alpha}{2}\sqrt{t^2-(2i+1-\xi)^2}\right)\eta(t-2i-1+\xi)\right] =$$

$$= \int_{t-\tau'}^{t} e^{-\frac{\alpha}{2}\tau} I_0\left(\frac{\alpha}{2}\sqrt{\tau^2-(2i+1-\xi)^2}\right) d\tau.$$

Из соотношений (I.12), (I.14) вытекает, что

$$w(\xi,t)=\frac{q_0}{\tau'}\Bigg[\sum_{i=0}^{\infty}\int_{t-\tau'}^{t}e^{-\frac{\alpha}{2}\tau}\cdot I_0\Big(\frac{\alpha}{2}\sqrt{\tau^2-(2i+1-\xi)^2}\Big)\,d\tau+$$

$$+\sum_{j=0}^{\infty}\int_{t-\tau'}^{t}e^{-\frac{\alpha}{2}\tau}\cdot I_0\Big(\frac{\alpha}{2}\sqrt{\tau^2-(2j+1+\xi)^2}\Big)\,d\tau\Bigg]. \qquad (I.I5)$$

При фиксированной паре значений ξ, t каждая из обеих сумм здесь содержит только конечное число слагаемых, причем в первой сумме

$$t > 2i+1-\xi \quad \text{или} \quad i < \frac{t-1+\xi}{2},$$

а во второй сумме

$$t > 2j+1+\xi \quad \text{или} \quad j < \frac{t-1-\xi}{2}.$$

Для $Q(\xi,s)$ получим аналогично

$$Q(\xi,s)=\frac{q_0}{s}-\frac{q_0(1-e^{-\tau's})}{\tau'\cdot s^2}\Bigg[\sum_{i=0}^{\infty}e^{-(2i+1-\xi)\sqrt{s^2+\alpha s}}- \qquad (I.I6)$$

$$-\sum_{j=0}^{\infty}e^{-(2j+1+\xi)\sqrt{s^2+\alpha s}}\Bigg].$$

Так как [6]

$$e^{-x\sqrt{s^2+\alpha s}}-e^{-\frac{\alpha}{2}x}\cdot e^{-xs}\doteq\frac{\alpha}{2}\,x e^{-\frac{\alpha}{2}t}\,\frac{I_1\big(\frac{\alpha}{2}\sqrt{t^2-x^2}\big)}{\sqrt{t^2-x^2}}\,\eta(t-x), \qquad (I.I7)$$

то получим:

$$\frac{1-e^{-\tau's}}{s^2}\cdot e^{-(2i+1-\xi)\sqrt{s^2+\alpha s}}\doteq\varphi_i(\xi,t),$$

где

$$\varphi_i(\xi,t)=e^{-\frac{\alpha}{2}(2i+1-\xi)}\big[(t-2i-1+\xi)\cdot\eta(t-2i-1+\xi)-$$

$$-(t-2i-1+\xi-\tau')\cdot\eta(t-2i-1+\xi-\tau')\big]+$$

$$+\frac{\alpha}{2}(2i+1-\xi)\int_{t-\tau'}^{t}(t-\tau)e^{-\frac{\alpha}{2}\tau}\,\frac{I_1\big(\frac{\alpha}{2}\sqrt{\tau^2-(2i+1-\xi)^2}\big)}{\sqrt{\tau^2-(2i+1-\xi)^2}}\,d\tau+$$

$$+\frac{\alpha}{2}(2i+1-\xi)\tau'\int_{2i+1-\xi}^{t-\tau'} e^{-\frac{\alpha}{2}\tau}\,\frac{I_1\left(\frac{\alpha}{2}\sqrt{\tau^2-(2i+1-\xi)^2}\right)}{\sqrt{\tau^2-(2i+1-\xi)^2}}\,d\tau. \qquad (I.I8)$$

Соответственно функция $q(\xi,t)$ получает вид:

$$q(\xi,t) = q_0 - \frac{q_0}{\tau'}\left[\sum_{i=0}^{\infty}\varphi_i(\xi,t) - \sum_{j=0}^{\infty}\psi_j(\xi,t)\right]. \qquad (I.I9)$$

Здесь $\psi_j(\xi,t)=\varphi_j(-\xi,t)$ и каждая из сумм содержит конечное число слагаемых, причем соответственно

$$i < \frac{t-1+\xi}{2} \quad \text{и} \quad j < \frac{t-1-\xi}{2}.$$

Формулы (I.I5) и (I.I9) упрощаются, если считать, что $\tau' \to 0$. Для практического расчета удобные формулы получим из (I.I2) и (I.I6), если в этих формулах общие члены суммирования разложить в ряд понижающим степеням s.

$$\frac{e^{-x\sqrt{s^2+\alpha s}}}{\sqrt{s^2+\alpha s}} = e^{-xs}\cdot e^{-\frac{x\alpha}{2}}\left[\frac{c_1}{s}+\frac{c_2}{s^2}+\frac{c_3}{s^3}+\frac{c_4}{s^4}+\dots\right] = \overline{\varphi}_{w,i}(\xi,s),$$

где

$$c_1 = 1,$$

$$c_2 = (x\alpha-4)\alpha/8,$$

$$c_3 = (x^2\alpha^2-16x\alpha+48)\alpha^2/128,$$

$$c_4 = (x^3\alpha^3-36x^2\alpha^2+360x\alpha-960)\alpha^3/3072,$$

Переходя в пространство оригиналов, получим:

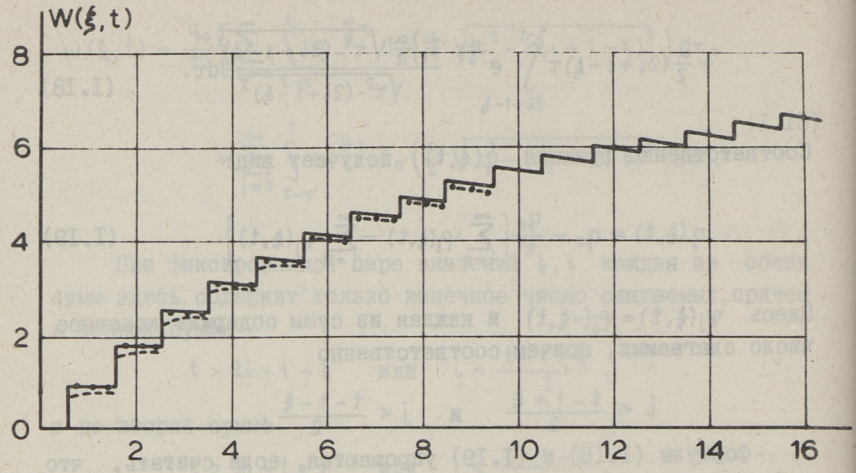
$$w(\xi,t) = q_0\left[\sum_{i=0}^{\infty}\varphi_{w,i}(\xi,t) + \sum_{j=0}^{\infty}\varphi_{w,j}(-\xi,t)\right], \qquad (I.20)$$

где

$$\varphi_{w,i}(\xi,t) = e^{-\frac{x_i\alpha}{2}}\left[c_1 + c_2(t-x_i) + \frac{c_3}{2!}(t-x_i)^2 + \frac{c_4}{3!}(t-x_i)^3 + \dots\right]\eta(t-x_i),$$

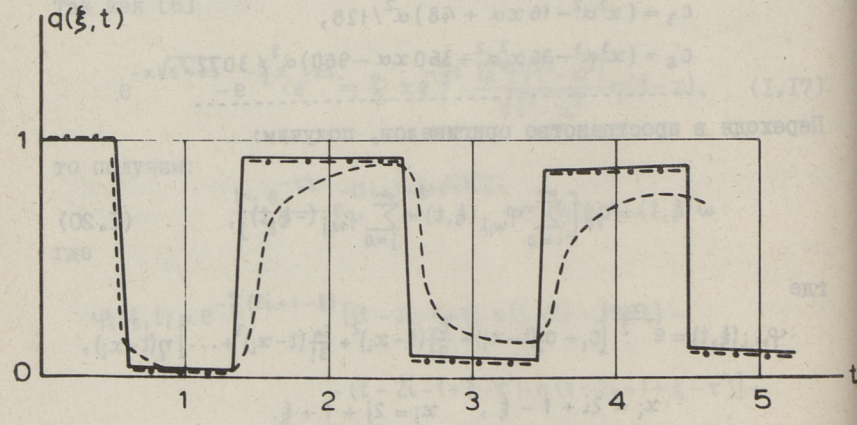
$$x_i = 2i+1-\xi, \qquad x_j = 2j+1+\xi.$$

Аналогично получим, что



Фиг. 1.

———— одномерная модель
– – – – – диссипативная модель
-.-.-.-.-.- приближенные формулы (1.20), (1.22).



Фиг. 2.

$$\frac{e^{-x\sqrt{s^2+\alpha s}}}{s} = e^{-xs}\cdot e^{-\frac{x\alpha}{2}}\left[\frac{a_1}{s}+\frac{a_2}{s^2}+\frac{a_3}{s^3}+\frac{a_4}{s^4}+\ldots\right] =$$

$$= \bar{\varphi}_{q,i}(\xi, s), \qquad (I.21)$$

где

$$a_1 = 1,$$

$$a_2 = x\alpha^2/8,$$

$$a_3 = (x^2\alpha^2 - 8x\alpha)\alpha^2/128,$$

$$a_4 = (x^3\alpha^3 - 24x^2\alpha^2 + 120x\alpha)\alpha^3/3072,$$

$$\text{— — — — — — — — — — — — — — — — — —}.$$

Функция $q(\xi,t)$ получает теперь вид:

$$q(\xi,t) = q_0 - q_0\left[\sum_{i=0}^{\infty}\varphi_{q,i}(\xi,t) - \sum_{j=0}^{\infty}\varphi_{q,j}(-\xi,t)\right], \qquad (I.22)$$

$$\varphi_{q,i}(\xi,t) = e^{-\frac{x_i\alpha}{2}}\left[a_1 + a_2(t-x_i) + \frac{a_3}{2!}(t-x_i)^2 + \frac{a_4}{3!}(t-x_i)^3 + \ldots\right]\eta(t-x_i). \qquad (I.23)$$

2. Численные результаты

Численные результаты для $w(\xi,t)$ и $q(\xi,t)$ были получены соответственно по формулам (I.I5), (I.I9) и (I.20), (I.22) с помощью программы на языке "Фортран-IУ" для ЭВМ ЕС-I022. Расчеты выполнены для величин $\tau' = 1730$, $\alpha = 0{,}13328$, $\xi = 0{,}4737$ и в формулах (I.2I), (I.23) были взяты члены порядка 3. Как показали расчеты, приближенные формулы (I.20) и (I.22) дали хорошие результаты почти во всех рассматриваемых точках. Результаты представлены на фиг. I и 2 соответственно.

Сопоставление с результатами, полученными при помощи диссипативной модели, показывает, что совпадение хорошее.

Литература

I. Сурин А.А. Гидравлический удар в водопроводах и борьба с ним. М., Трансжелдориздат., I946.

2. Аронович Г.В., Картвелишвили Н.А., Любимцев Я.К. Гидравлический удар и уравнительные резервуары. М., Наука, I968. 247 с.

3. Чарный И.А. Неустановившиеся движения реальной жидкости в трубах. М., Недра, 1975. 296 с.

4. Зилке. Трение, зависящее от частоты, при неустановившемся трении в трубопроводе. – Теор. осн. инж. расч. 1968, № 1, с. 120-127.

5. Холмбоу, Рудло. Влияние вязкого трения на распространение сигналов в гидравлических линиях. – Теор. осн. инж. расч. 1967, № 1, с. 202-209.

6. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. М., Наука, 1965. 207 с.

7. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М., Высш. школа, 1965. 465 с.

E. Ruustal

The Application of Onedimensional Mathematical Model for Investigation of Unsteady Flow of Liquid in Tube

Summary

The problem of unsteady flow of liquid is solved with onedimensional mathematical model, when the pressure is constant in one end of the pipe and drops quickly in the other end. The exact solution for many first reflections of pressure wave and the velocity is deduced by solving the integrals with the operational and the numerical methods. Asympthotical formulae for the velocity and the pressure at small intervals are deduced.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.54.013.2

Э.А. Руустал, Л. Сарв

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАЗГОННОМ ТЕЧЕНИИ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО ОБРАЩЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Нестационарную задачу осесимметричного движения сжимаемой жидкости в круглых трубах описывают следующие уравнения в безразмерных переменных [1]:

$$\frac{\partial u_\xi}{\partial \tau} - \varkappa\left(\frac{\partial^2 u_\xi}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta}\cdot\frac{\partial u_\xi}{\partial \eta}\right) + \frac{\partial q}{\partial \xi} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial q}{\partial \eta} = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial u_\eta}{\partial \eta} + \frac{1}{\eta}u_\eta + \frac{\partial q}{\partial \tau} = 0. \tag{3}$$

Если обозначить $w = 2\int_0^1 u_\xi \eta \, d\eta$, то уравнение (3) принимает вид

$$\frac{\partial w}{\partial \xi} + \frac{\partial q}{\partial \tau} = 0. \tag{3'}$$

Здесь безразмерные величины определяются таким же образом, как и в работе [1].

Примем следующие начальные и граничные условия:

$$u_\xi = u_\eta = 0, \quad q = q_0, \text{ при } \tau = 0; \tag{4}$$

$$q = q_0, \text{ при } \xi = 0;$$

$$q = q_0\left[1 - \frac{\tau}{\tau'} - \eta(\tau-\tau')\left(1-\frac{\tau}{\tau'}\right)\right], \text{ при } \xi = 1, \tag{5}$$

где $\eta(\tau)$ – единичная функция Хевисайда

$$u_\eta = 0, \quad \text{при} \quad \eta = 0; \tag{6}$$
$$u_\xi = u_\eta = 0. \quad \text{при} \quad \eta = 1.$$

Решаем систему уравнений (I)–(3) при начальных и граничных условиях (4)–(6) операционным методом.

Если обозначить

$$\bar{f}(\xi,\eta,s) = \int_0^\infty f(\xi,\eta,\tau)\, e^{-s\tau} d\tau \tag{7}$$

и провести преобразование Лапласа по времени уравнений (I), (2), (3′) с учетом (4), получим

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_\xi}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta}\cdot\frac{\partial \bar{u}_\xi}{\partial \eta} - \frac{s}{\varkappa}\left(\bar{u}_\xi + \frac{1}{s}\cdot\frac{\partial \bar{q}_\gamma}{\partial \xi}\right) = 0, \tag{8}$$

$$\frac{\partial \bar{q}_\gamma}{\partial \eta} = 0, \tag{9}$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \xi} + s\bar{q}_\gamma - q_0 = 0. \tag{10}$$

Из соотношений (6), (8), (9), (10) получим [I]:

$$\bar{u}_\xi = \frac{\partial \bar{q}_\gamma}{\partial \xi}\cdot\frac{I_0(\eta\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}) - I_0(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}{s\, I_0(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})} \tag{11}$$

и

$$\bar{w} = -\frac{I_2(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}{s I_0(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}\cdot\frac{\partial \bar{q}_\gamma}{\partial \xi}. \tag{12}$$

где I_0 и I_2 – функция Бесселя нулевого и второго порядка от мнимого аргумента.

Уравнения (3′) и (12) образуют систему для определения функций $\bar{w}$ и $\bar{q}_\gamma$. Исключая функцию $\bar{w}$, получим:

$$\frac{\partial^2 \bar{q}_\gamma}{\partial \xi^2} - \gamma^2(s)\bar{q}_\gamma + \frac{\gamma^2(s)}{s} q_0 = 0, \tag{13}$$

где

$$\gamma^2(s) = \frac{s^2 I_0(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}{I_0(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}. \tag{14}$$

Решение уравнения (13) при граничных условиях (5) имеет вид

$$\bar{q}_\eta = \frac{q_0}{s} - \frac{q_0(1-e^{-s\tau'})}{\tau' \cdot s} \cdot \frac{sh(\gamma(s)\cdot\xi)}{sh\gamma(s)}. \qquad (15)$$

По формулам (11), (12) и (15) имеем

$$\bar{w} = \frac{q_0(1-e^{-s\tau'})}{\tau' \cdot s \cdot \gamma(s)} \cdot \frac{ch(\gamma(s)\xi)}{sh\gamma(s)}, \qquad (16)$$

$$\bar{u}_\xi = \frac{q_0(1-e^{-s\tau'})\cdot\gamma(s)\cdot\left[I_0(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}) - I_0(\eta\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})\right]}{\tau' \cdot s^3 \cdot I_0(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})} \cdot \frac{ch(\gamma(s)\xi)}{sh\gamma(s)}. \qquad (17)$$

Из уравнения (3), учитывая (15) и (17), получим:

$$\frac{\partial \bar{u}_\eta}{\partial \eta} + \frac{1}{\eta}\bar{u}_\eta = K(\xi, s)\left[I_0(\eta\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}) - \frac{2I_1(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}{\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}}\right], \qquad (18)$$

где $$K(\xi, s) = \frac{q_0(1-e^{-s\tau'})\,sh(\gamma(s)\xi)}{\tau' \cdot s \cdot I_2(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})\cdot sh\gamma(s)}$$

и I_1 – функция Бесселя первого порядка от мнимого аргумента.

Решением уравнения (18) является:

$$\bar{u}_\eta = \frac{q_0(1-e^{-s\tau'})\cdot sh(\gamma(s)\xi)}{\tau' \cdot s \cdot \sqrt{\frac{s}{\varkappa}} \cdot I_2(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})\, sh\gamma(s)} \cdot \left[I_1(\eta\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}) - \eta I_1(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})\right]. \qquad (19)$$

Точное обращение $\bar{q}$, $\bar{w}$, $\bar{u}_\xi$ и $\bar{u}_\eta$ затруднительно. Имеется целый ряд приближенных методов для обращения преобразования Лапласа. Мы используем здесь способ Беллмана [5], который состоит в следующем:

Из

$$\int_0^\infty e^{-st} f(bt)\,dt = \frac{1}{b} F\left(\frac{s}{b}\right)$$

получим

$$\int_0^1 y^{s-1} f(-b\ln y)\,dy = \frac{1}{b} F\left(\frac{s}{b}\right), \qquad (20)$$

где $y = e^{-t}$.

Используя квадратурную формулу Гаусса, получим

$$\sum_{k=1}^{N} w_k y_k^{s-1} f(-b\ln y_k) \approx \frac{1}{b} F\left(\frac{s}{b}\right), \qquad (21)$$

где y_k – нули полинома Лежандра и w_k – весы.

Если взять $s = 1,2,\ldots,N$, получим для вычисления $f(-b\ln y_k)$ следующую систему:

$$\sum_{k=1}^{N} w_k y_k^{i-1} f(-b\ln y_k) = \frac{1}{b} F\left(\frac{i}{b}\right), \quad i = 1,2,\ldots,N. \qquad (22)$$

Решением системы (22) является

$$f(-b\ln y_i) = \sum_{k=1}^{N} a_{ik} \frac{1}{b} F\left(\frac{k}{b}\right), \quad i = 1,2,\ldots,N, \qquad (23)$$

где a_{ik} – элементы обратной матрицы системы (22).

Величины a_{ik} и $-\ln y_i$ табулированы в работе [5] для $i = 1,2,\ldots,N$ и $N = 3,4,\ldots,15$.

Если обозначить $\tau = -b\ln y_i$, то получим

$$f(\tau) = \sum_{k=1}^{N} a_{ik} (-\ln y_i)/\tau \, F(-k\ln y_i/\tau) \qquad (24)$$

и таким образом, мы используем из обратной матрицы только один ряд.

Формулу (24) можно использовать для восстановления таких оригиналов, которые изменяются плавно. В практических вычислениях мы поступаем следующим образом: для каждого интервала $(2n+1-\xi,\ 2n+1+\xi)$, $(2n+1+\xi,\ 2n+3-\xi)$, $n = 0,1,2,\ldots$ мы применяем формулу (24). Если разложить $\frac{ch(\gamma(s)\xi)}{sh\gamma(s)}$ и $\frac{sh(\gamma(s)\xi)}{sh\gamma(s)}$ в ряд, то получим

$$w(\xi,\tau) = q_0 \left[\sum_i \varphi_{w,i}(\xi,\tau-x_i)\eta(\tau-x_i) + \sum_j \varphi_{w,j}(-\xi,\tau-x_j)\eta(\tau-x_j)\right], \qquad (25)$$

где $x_i = 2i+1-\xi$, $x_j = 2j+1+\xi$

и $\varphi_{w,i}(\xi,\tau) = L^{-1}\left\{\frac{e^{-x_i(\gamma(s)-s)}}{\gamma(s)}\right\}$, L^{-1} – обратное преобразование Лапласа.

Аналогично

$$q_i(\xi,\tau) = q_0 - q_0\Big[\sum_i \varphi_{q,i}(\xi,\tau-x_i)\,\eta(\tau-x_i) - \sum_j \varphi_{q,j}(-\xi,\tau-x_j)\,\eta(\tau-x_j)\Big], \quad (26)$$

где $$\varphi_{q,i}(\xi,\tau) = L^{-1}\left\{\frac{e^{-x_i(\gamma(s)-s)}}{s}\right\}$$

$$u_\xi(\xi,\eta,\tau) = q_0\Big[\sum_i \varphi_{u_\xi,i}(\xi,\eta,\tau-x_i)\eta(\tau-x_i) + \sum_j \varphi_{u_\xi,i}(\xi,\eta,\tau-x_j)\eta(\tau-x_j)\Big], \quad (27)$$

где

$$\varphi_{u_\xi,i}(\xi,\eta,\tau) = L^{-1}\left\{\frac{\gamma(s)}{s^2}\left(1 - \frac{I_0\,\eta\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}}{I(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}\right)\cdot e^{-x_i(\gamma(s)-s)}\right\}.$$

$$u_\eta(\xi,\eta,\tau) = q_0\Big[\sum_i \varphi_{u_\eta,i}(\xi,\eta,\tau-x_i)\eta(\tau-x_i) - \sum_j \varphi_{u_\eta,j}(-\xi,\eta,\tau-x_j)\eta(\tau-x_j)\Big], \quad (28)$$

где $$\varphi_{u_\eta,i}(\xi,\eta,\tau) = L^{-1}\left\{\frac{I_1(\eta\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}) - \eta\, I_1(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}{\sqrt{\frac{s}{\varkappa}}\cdot I_2(\sqrt{\frac{s}{\varkappa}})}\cdot e^{-x_i(\gamma(s)-s)}\right\}$$

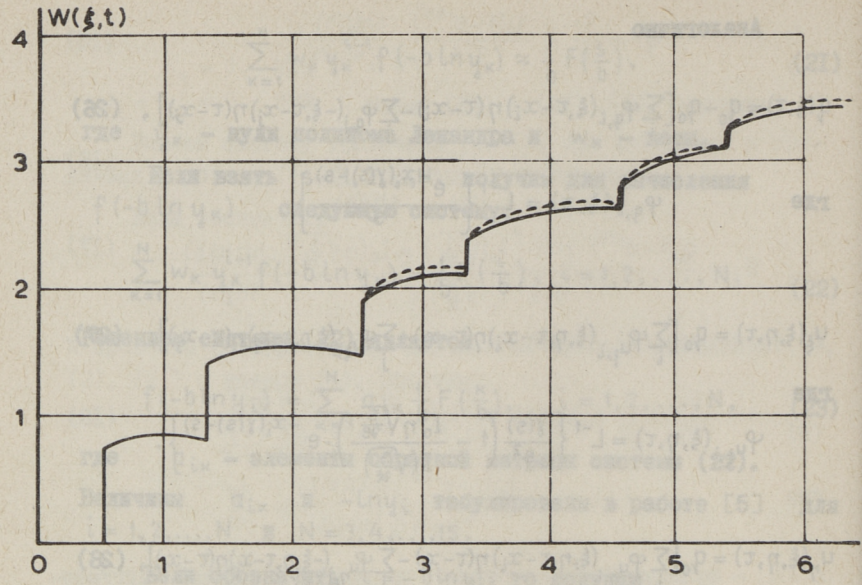
Каждая сумма содержит только конечное число слагаемых, причем $i < \frac{t-1+\xi}{2}$ и $j < \frac{t-1-\xi}{2}$.

Численные результаты получены на ЭВМ ЕС-1022 и алгоритмы записаны на языке "Фортран-IУ". Результаты представлены на фигурах I–3, где параметры следующие $\xi = 0{,}4737$, $\varkappa = 0{,}1666\cdot 10^{-1}$.

Как показано в [3], систему (I), (2), (3) можно преобразовать к виду

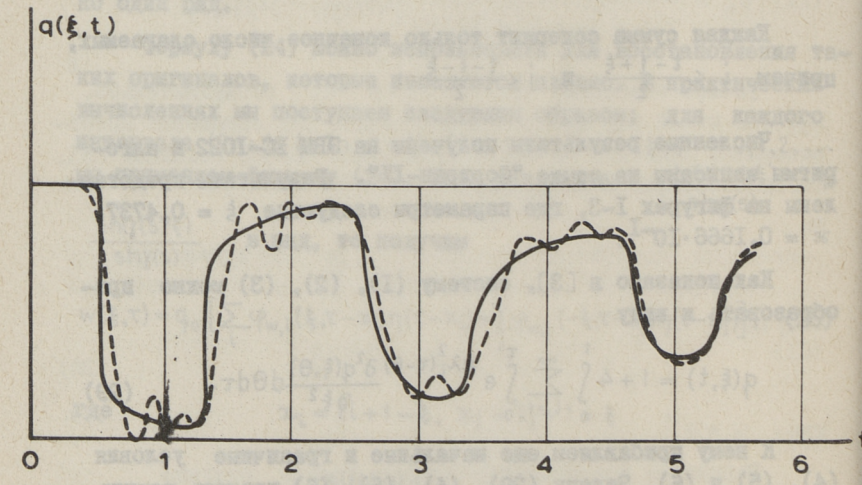
$$q(\xi,t) = 1 + 4\int_0^t \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^\tau e^{\varkappa\lambda_i^2(\tau-\theta)}\frac{\partial^2 q(\xi,\theta)}{\partial\xi^2}\,d\theta\,d\tau. \quad (29)$$

К нему прибавляем еще начальные и граничные условия (4), (5) и (6). Задачу (29), (4), (5), (6) удалось решить методом конечных разностей. При этом мы воспользовались следующими методами и приемами.

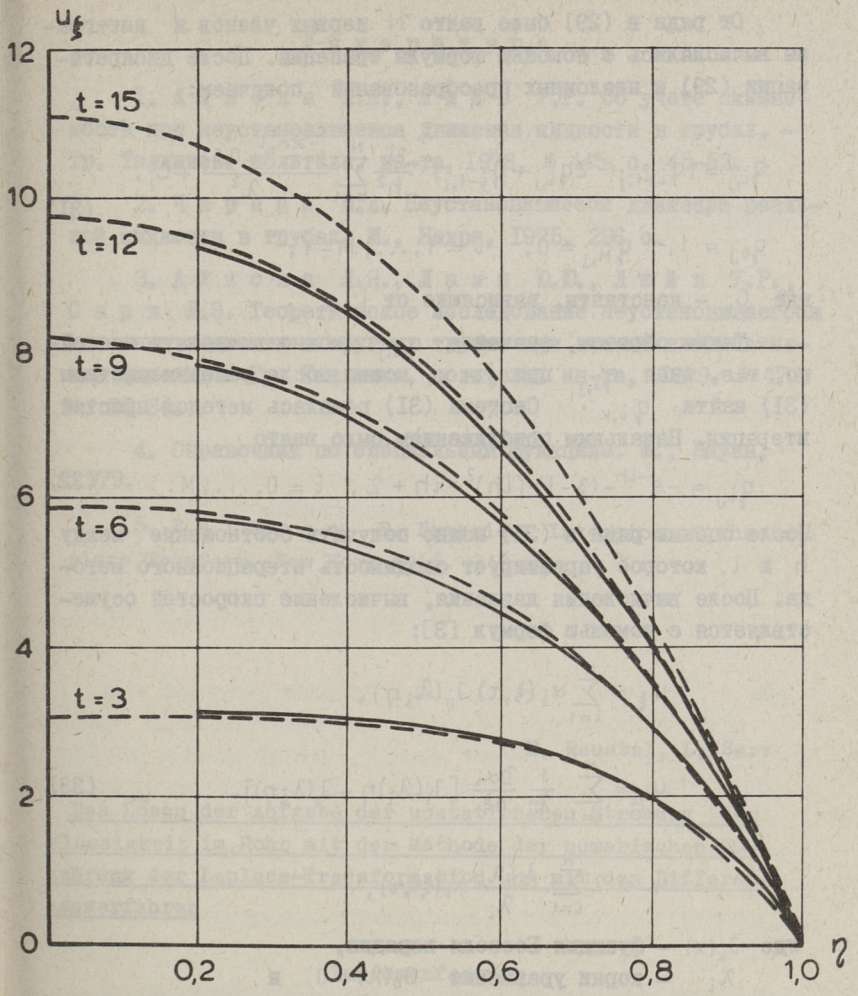


Фиг. 1. Решение задачи о разгонном течении сжимаемой жидкости в трубе при помощи метода численного обращения преобразования Лапласа и метода конечных разностей.

———— операционный метод
– – – – – метод конечных разностей



Фиг. 2. Решение задачи о разгонном течении сжимаемой жидкости в трубе при помощи метода численного обращения преобразования Лапласа и метода конечных разностей.



Фиг. 3. Решение задачи о разгонном течении сжимаемой жидкости в трубе при помощи метода численного обращения преобразования Лапласа и метода конечных разностей.

———— операционный метод

– – – – – – метод конечных разностей

Функция $q_{i,j} = q(ih, jl)$, $(i = 0, \ldots, M, j = 0, \ldots, T)$ **определялась в узлах сетки** $\xi = ih$, $t = jl$, **где** h **и** l **шаги по** ξ **и** t **соответственно.**

Для аппроксимации производной была использована формула

$$\frac{\partial^2 q_{i,j}}{\partial \xi^2} = \frac{1}{h^2}(q_{i+1,j} - 2q_{i,j} + q_{i-1,j}) \qquad (30)$$

От ряда в (29) было взято N первых членов и интегралы вычислялись с помощью формулы трапеций. После дискретизации (29) и несложных преобразований получаем:

$$q_{i,j} = (q_{i+1,j} - 2q_{i,j} + q_{i-1,j}) \cdot \frac{2l}{h^2} \sum_{k=1}^{N} \frac{e^{-\varkappa\lambda_k^2 l} + 0{,}5\,l}{\lambda_k^2} + C_j,$$

$$q_{0,j} = 1, \quad q_{M,j} = 0, \quad i = 1, \ldots, M-1, \tag{31}$$

где C_j – константы, зависящие от j.

Таким образом, значения $q_{i,j}$ можно вычислять послойно, т.е. зная $q_{i,j}$ при $j < \kappa$, можно после решения системы (31) найти $q_{i,\kappa}$. Система (31) решалась методом простой итерации. Начальным приближением было взято

$$q_{i,j} = -e^{-ih} - (3-l)\cdot(ih)^2 + ih + 2, \quad i = 0, \ldots, M. \tag{32}$$

После оценки ряда в (31) можно получить соотношение между h и l, которое гарантирует сходимость итерационного метода. После вычисления давления, вычисление скоростей осуществляется с помощью формул [3]:

$$u_\xi = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i(\xi,\tau)\, J_0(\lambda_i \eta),$$

$$u_\eta = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\lambda_i} \frac{\partial \alpha_i}{\partial \xi} [J_1(\lambda_i)\eta - J_1(\lambda_i \eta)], \tag{33}$$

$$w = 2 \sum_{i=1}^{N} \frac{J_1(\lambda_i)}{\lambda_i} \alpha_i(\xi,\tau),$$

где $J_\kappa(x)$ – функция Бесселя порядка,

λ_i – корни уравнения $J_0(\lambda) = 0$ и

$$\alpha_i(\xi,\tau) = -\frac{2}{\lambda_i J_1(\lambda_i)} \int_0^\tau e^{-\varkappa\lambda_i^2(\tau-\theta)} \cdot \frac{\partial q(\xi,\theta)}{\partial \xi}\, d\theta.$$

Для вычисления функции Бесселя были использованы приближения полиномами [4].

Численные эксперименты проводились для $h = 0{,}05$, $l = 0{,}03$, $N = 50$, $\varkappa = 1{,}6666 \cdot 10^{-1}$. Скорости вычислялись для $\xi = 0{,}4737$. Сходство со скоростями, вычисляемыми операционным методом, было довольно хорошее.

Литература

I. Айнола Л.Я., Лийв У.Р. Об учете сжимаемости при неустановившемся движении жидкости в трубах. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1978, № 445, с. 45–52.

2. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М., Недра, 1975. 296 с.

3. Айнола Л.Я., Лампп Ю.Д., Лийв У.Р., Сарв Л.Э. Теоретическое исследование неустановившегося движения жидкости в круглых трубах при помощи диссипативной модели. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1979, № 472, с. 25–34.

4. Справочник по специальным функциям. М., Наука, 1979.

5. Bellman, R. Numerical Inversion of the Laplace Tromform. New York 1966. 249 p.

E. Ruustal, L. Sarv

Das Lösen der Aufgabe der unstationären Strömung der Flüssigkeit im Rohr mit der Methode der numerischen Umkehrung der Laplace-Transformation und mit dem Differenzenverfahren

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Differentialgleichungen (1.)-(3.) mit der Methode der numerischen Umkehrung der Laplace-Transformation und mit Differenzenverfahren gelöst. Das Zusammenfallen der Resultate, die mit den beiden Methoden erzielt worden sind, ist befriedigend.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.113

Я.Я. Кару, В.Р. Вийес

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ ВОДОИСТОЧНИКА НА ЭВМ

Задачи экономии дефицитных реагентов и снижения себестоимости обработки воды приводят в условиях роста водопотребления городов, использующих воду многих малых рек и водоемов, к созданию регулируемого водосбора, позволяющего маневрировать водоисточниками.

Это возможно при наличии АСУВ, которая может функционировать на базе автоматической системы сбора и передачи исходной информации об изменении свойств воды в водоисточниках.

Как известно, наиболее лимитирующим реагентом в настоящее время является коагулянт. Поэтому экономичность принятых решений зависит, прежде всего, от правильного и оперативного определения и поддержания необходимой дозы коагулянта, которое до сих пор выполняется вручную, путем пробного коагулирования. При создании АСУВ такой метод нецелесообразен, поскольку он малооперативен, трудоемок и может сопровождаться погрешностями субъективного характера [1].

В настоящей статье рассматриваются принципы использования систем автоматической регистрации свойств исходной воды при расчете необходимых доз коагулянта и создания на этой основе рекомендации для оперативного регулирования схемы водосбора.

Учитывая большой объем исходной информации, были разработаны соответствующие математические модели и составлены программы для ЭВМ.

В данное время система водоснабжения гор. Таллина использует воды одного водохранилища, озера Юлемисте и семи малых рек. Магистральный канал протяженностью более 100 км получает начало из реки Пярну, собирает воды всех малых рек и водохранилища и впадает в озеро Юлемисте, проходя при этом в основном по реке Пирита. Учитывая пропускную способность каналов, станций перекачки, а также мощность собственного водосбора реки Пирита, можно привести следующие данные о роли разных источников в обеспечении нужд водопровода гор. Таллина:

1) река Пярну - в средних гидрологических условиях обеспечивает до 7 % и в период половодья до 13 % нужд города;

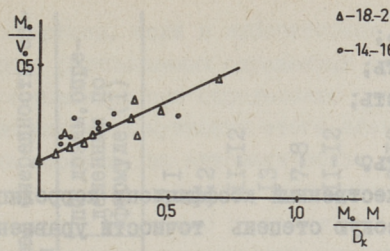
2) река Ягала совместно с рекой Амбла - соответственно до 30 и до 60 %;

3) река Тыдва - до 4 %;

4) водохранилище Паункюла - до 60 %.

В больших пределах меняются свойства воды в разных водоисточниках. Например, по данным лаборатории водоочистной станции в период 1971-1976 гг. цветность воды в озере Юлемисте колебалась в пределах 26-77° Pt-Co, в то время как около водозабора на реке Пярну цветность была лишь 12-26°, а у плотины Васькяла на реке Пирита этот показатель доходил до 142° - Pt-Co.

В работе [2] приведены результаты исследования технологических свойств воды разных водоисточников в летний и осенний периоды 1979 года. Было установлено, что эффективность использования коагулянта зависит в основном от соотношения мутности к цветности, причем предварительный хлор расходуется главным образом для устранения цветности воды. Выяснилось также, что в летний и осенний периоды предварительное хлорирование с повышенными дозами не позволяет уменьшить необходимую дозу коагулянта. Дальнейшие исследования в зимний период показали, что технологические свойства воды меняются по временам года более интенсивно, чем физико-химические показатели, причем характер взаимосвязи между отдельными технологическими показателями в основном сохраняется.



Фиг. 1. Эффективность использования коагулянта осенью и зимой.
D_K – доза коагулянта, M_0 и M – мутность воды до и после коагулирования, V_0 – цветность исходной воды.

На фиг. I приведен график, характеризующий эффективность использования коагулянта. Как видно из графика, ранее установленная закономерность сохраняется и зимой. Что касается действия хлора, то выяснилось, что зимой предварительное хлорирование оказывает большое влияние на ход процесса коагуляции. При отсутствии предварительного хлорирования и при малых дозах хлора процесс коагуляции малоэффективен. В итоге можно сделать два вывода.

Во–первых, технологическая схема водоочистной станции должна быть достаточно гибкой, позволяющей оперативно вводить необходимые корректировки по мере изменения свойств исходной воды; во–вторых, создание регулируемой схемы водосбора с использованием АСУВ обеспечит наиболее благоприятные условия для сознательного регулирования свойств исходной воды. Уже известен опыт Таллинского ПУ "Водоканал" пропускать паводковые загрязненные воды в море и заполнять водохранилище более качественной водой. Однако более полное решение проблем должно базироваться на применении математических моделей для оценки технологических свойств воды. Первым шагом в создании таких моделей явилась разработка системы регрессионных уравнений для воды озера Юлемисте [3], при помощи которых, на основе анализа дисперсионных отношений, было получено уравнение (I).

$$Y = 12{,}20 - 1{,}04\sqrt{x_1} + 0{,}57\sqrt{x_2} + 0{,}79\sqrt{x_3} + \\ + 10^{-3}(18{,}50\, l^{x_4} + 6{,}5\, l^{x_6}) + 203{,}70\left(\frac{1}{x_5^2}\right), \qquad (I)$$

где Y – необходимая доза коагулянта;
x_1 – температура воды;

x_2 – мутность;

x_3 – цветность;

x_4 – щелочность;

x_5 – pH;

x_6 – жесткость.

При этом множественный коэффициент корреляции $P > 0,8$, что показывает высокую степень точности уравнения (I).

Задача дальнейших исследований заключалась в составлении списка рекомендуемого порядка водосборов, т.е. в разработке такой математической модели, при помощи которой, пользуясь результатами автоматического определения свойств воды в различных водоисточниках, можно будет составить рекомендуемую очередность забора воды из существующих источников с учетом обеспечения минимальной дозы коагулянта.

В таблице I представлены результаты такой обработки для различных точек водосбора. В последних столбцах приведена очередность использования воды данной точки. Как следует из таблицы, для большинства точек применение расчетной формулы (I) обеспечит хорошее совпадение с результатами лабораторного определения дозы коагулянта. Большое расхождение в некоторых рядах (I0, I2, I4), очевидно, можно объяснить субъективностью лабораторного определения дозы коагулянта, а также тем, что в лабораторных условиях пробное коагулирование осуществляется при комнатной температуре.

Применение формулы (I) в качестве математической модели для создания АСУВ требует автоматического определения всех входящих в эту формулу показателей. Однако в настоящее время в широком потреблении нет приборов для автоматического определения цветности, жесткости и щелочности воды. Поэтому рассмотрим парные корреляции между автоматически измеряемыми и неизмеряемыми параметрами.

На фиг. 2 и 3 приведены графики зависимости щелочность – мутность и жесткость – мутность, которые можно представить эмпирическими уравнениями

$$x_4 = \frac{1}{0,2x_2 + 0,3} + 2,7 \qquad (2)$$

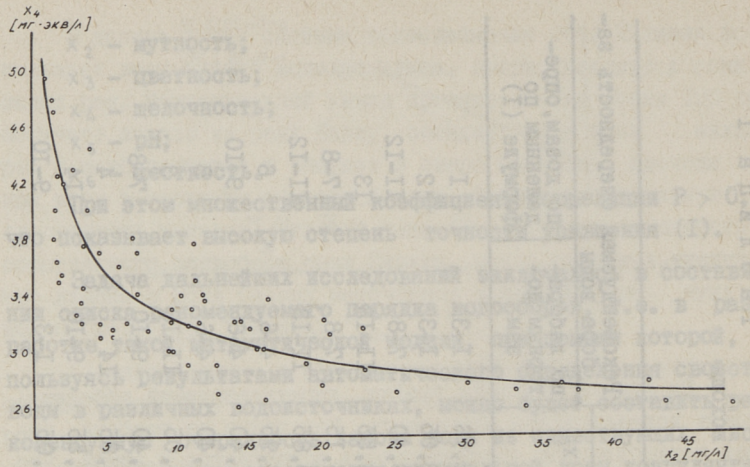
и

$$x_6 = \frac{1}{0,1x_2 + 0,2} + 3,4, \qquad (3)$$

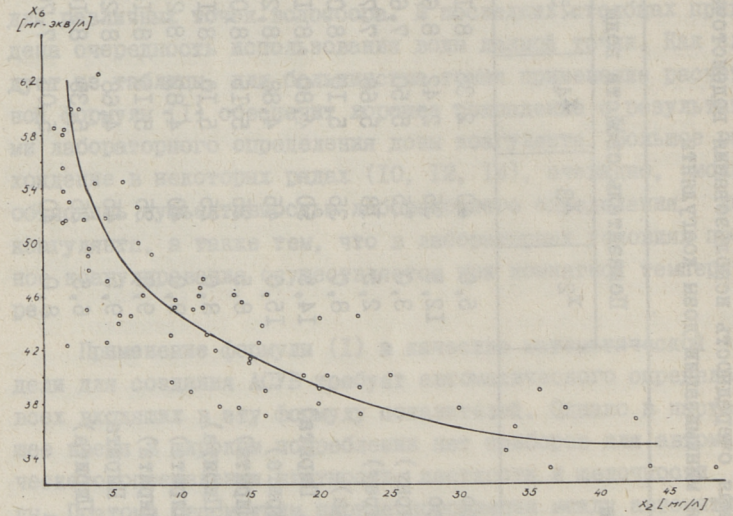
Таблица I

Рекомендуемая очередность использования водоисточников исходя из критерия минимизации дозы коагулянта

Точки водозабора	Показатель свойств воды					Рекомендуемая очередность забора воды	
	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	по лабораторным дозам	по дозам, определенным по формуле (I)
I. Чудское озеро	5,0	40	2,35	8,I5	2,76	I-3	I
2. Чудское озеро	I2,5	35	2,42	8,60	3,05	I-3	2
3. Пурди (р. Пярну)	3,0	I5	5,50	7,65	6,40	7-8	II-I2
4. Пурди (р. Пярну)	2,5	I8	5,66	7,70	6,55	II-I3	I3
5. Саэ (р. Ягала)	8,0	35	5,I0	8,00	6,I5	7-8	7-8
6. Паункюла (р. Пирита)	I4,5	50	4,80	8,I0	5,85	II-I3	II-I2
7. Саула (р. Пирита)	I5,0	45	4,88	8,25	5,95	4-6	6
8. Тухала (р. Пирита)	8,5	25	5,I5	8,00	6,40	4-6	9-I0
9. Ангерья (р. Пирита)	8,0	25	5,I0	8,I5	6,40	4-6	5
I0. Патика (р. Пирита)	9,0	40	4,82	8,25	6,05	II-I3	3
II. Патика (р. Пирита)	9,0	25	5,I5	8,I5	6,40	9-I0	7-8
I2. Васькяла (р. Пирита)	9,5	45	4,68	8,25	5,85	I4	4
I3. Ангерья (р. Пирита)	6,5	25	5,35	8,I0	7,55	9-I0	I4
I4. Р. Пылтсамаа	8,0	40	5,05	7,70	6,05	I-3	9-I0



Фиг. 2. Взаимосвязь щелочности и мутности исходной воды:
x_4 – щелочность, x_2 – мутность.



Фиг. 3. Взаимосвязь жесткости и мутности исходной воды:
x_6 – жесткость, x_2 – мутность.

Парные корреляции цветности с другими переменными неудовлетворительны, поэтому необходимо пользоваться функциями типа $x_3 = f(x_1, x_2, x_5)$. Однако следует учесть, что некоторые показатели имеют при автоматическом определении другой принцип регистрации, чем при лабораторном проведении

анализов. Например, если в лабораторных анализах, как правило, влияние растворенных окрашенных веществ (т.е. цветность) высчитывается при определении мутности, то автоматическая регистрация мутности этого сделать не позволяет. Поэтому при переходе на автоматическую регистрацию свойств воды водоисточников необходим определенный период "обкатки" системы, во время которого производится корректировка коэффициентов регрессионных уравнений математической модели.

Литература

I. Еленин С.Н., Карлинская М.И., Михайлова Г.В. Использование математической статистики для нахождения зависимости дозы коагулянта от качественных показателей воды. – Научные труды академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, М., 1974, № 100, с.9–20.

2. Кару Я.Я., Реммел В.В., Паллъ В.Х. Исследование технологических свойств воды водоисточника при решении водохозяйственных задач. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1980, № 485, с. 61–65.

3. Вийес В.Р., Валле П.У. О возможности применения регрессионного анализа при оценке дозы коагулянта водоочистной станции. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1979, № 472, с. 67–75.

J. Karu, V. Viies

Modelling of Technological Characteristics of Water Using Computer

Summary

The article describes the possibility of optimizing the work in water purification plant using operated water intake. The operating is based on the technological characteristics of natural water.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.16

Я.Я. Кару

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАГРУЗКИ СКОРЫХ ФИЛЬТРОВ

В исследованиях процесса скорого фильтрования в настоящее время одним из основных направлений является поиск новых высокоэффективных фильтрующих материалов, способных заменить дефицитный кварцевый песок и отличающихся более высокими технологическими и экономическими показателями. Среди таких материалов следует назвать прежде всего дробленый керамзит, шунгизит, гранулированные шлаки и др. В настоящей статье рассматриваются возможности обобщения результатов технологических исследований, проведенных с разными фильтрующими материалами, используя для этой цели вычислительную технику. В качестве сравниваемых материалов применялись кварцевый песок Таллинской водоочистной станции, гранулированный (недробленый) керамзит Южной водоочистной станции г. Ленинграда, дробленый керамзит Обуховского домостроительного комбината г. Ленинграда и гранулированные шлаки никелевого производства комбината "Печенганикель". Исследования технологической эффективности данных фильтрующих материалов проводились на Таллинской водоочистной станции при параллельной работе колонок диаметром 195 мм. Перед загрузкой в колонны фильтрующие материалы просеивались через сита 1,2 и 0,6 мм. Гранулометрические и физико-механические показатели материалов определялись по общепринятым методикам, полученные результаты приведены в таблице 1.

Согласно методике технологического моделирования [1] и требований СНиП II-31-74 оптимальный режим работы скорого фильтра достигается при условии

$$t_з = (1{,}2 \div 1{,}3)\, t_н, \qquad (1)$$

где $t_з$ – продолжительность защитного действия фильтра;

$t_н$ – время достижения предельной потери напора фильтра.

Показатели $t_з$ и $t_н$ определяются из формул

$$t_з = \frac{1}{K}\frac{b}{a}\left(x - \frac{X_0}{b}\right) \qquad (2)$$

и

$$t_н = \frac{H_{пр.} - H_0}{H_0 F(A)}\frac{b}{a}x, \qquad (3)$$

где K и X_0 – коэффициенты, зависящие от соотношения концентрации взвешенных веществ в фильтрате и исходной воде;

$\frac{b}{a} = \frac{K}{n}$ и $b = \frac{X_0}{x_0}$ – параметры фильтрования;

x – толщина слоя фильтрующей загрузки;

x_0 и n – показатели, для экспериментального определения которых можно использовать пьезометрический метод [2];

$H_{пр}$ и H_0 – соответственно максимальная и начальная потери напора в фильтре;

$F(A)$ – функция, зависящая от величины предельной насыщенности порового пространства загрузки отложениями.

Функция $F(A)$ рассчитывается по формуле (3), используя результаты технологического эксперимента и преобразуя формулу (3) в виде

$$\frac{h}{t} = i_0 F(A)\frac{a}{b}, \qquad (4)$$

где $\frac{h}{t}$ – темп прироста потери напора в загрузке;

$i_0 = \frac{H_0}{x}$ – гидравлический уклон в чистой загрузке.

Зная $F(A)$, можно рассчитать предельную насыщенность порового пространства A, применяя формулу [3]

$$F(A) = 0{,}15\left[\frac{1}{(1-A)^3} - 1\right]. \qquad (4)$$

Таким образом, на основе опытов с применением фильтрационных колонн определяются параметры фильтрования $b, \frac{a}{b}, i_0$ и A. Для перехода к другим скоростям фильтрования и диаметрам зерен фильтрующего материала необходимо использовать переходные формулы

$$b = b^*\left(\frac{V^*}{V}\right)^{0,7}\left(\frac{d^*}{d}\right)^{1,7}$$

Таблица I

Гранулометрические и физико-механические показатели фильтрующих материалов

Материал	Номер фильтра	Удельный вес, г/см^3	Объемный вес г/см^3	Кажущийся удельный вес, г/см^3	Открытая пористость, %	Закрытая пористость, %	Измельчаемость, %	Истираемость, %	$d_э$ мм	$K = \frac{d_{80}}{d_{10}}$
Кварцевый песок Таллинской ВОС	I	2,6	I,58	2,57	38,5	0,7	0,I8	0,22	0,97	I,47
Гранулированный керамзит Южной ВОС г. Ленинграда	2	2,4	0,74	I,6	53,8	I5,6	0,II	0,46	I,07	I,54
Дробленый керамзит Обуховского ДСК	3	2,3	0,76	2,06	63,I	3,9	0,5	I,22	0,99	I,9I
Гранулированный шлак комбината "Печенганикель"	4	4,0	I,89	3,23	4I,5	II,3	I,53	0,2	0,84	I,87

$$\left.\begin{aligned} \frac{a}{b} &= \left(\frac{a}{b}\right)^{*}\left(\frac{V}{V^{*}}\right)^{1,7}\left(\frac{d^{*}}{d}\right)^{0,7} \\ i_0 &= i_0^{*}\left(\frac{V}{V^{*}}\right)\left(\frac{d^{*}}{d}\right)^{2} \\ 1-A &= (1-A)^{*}\left(\frac{V}{V^{*}}\right)^{0,5}\left(\frac{d}{d^{*}}\right)^{0,25} \end{aligned}\right\}, \qquad (5)$$

где звездочками обозначены эталонные значения показателей, определяемые при эталонной скорости фильтрования V^{*}=10 м/ч и эталонном диаметре зерен загрузки d^{*} = 1 мм.

Подставим $t_н$ из формулы (3) в формулу (1) и приравняем последнюю к формуле (2). Полученное уравнение выражаем через толщину слоя фильтрующей загрузки

$$x = \frac{3{,}75\,b\,K + i_0 F(A) X_0}{[i_0 F(A) + 1{,}25\, i_0 K]\, b}. \qquad (6)$$

При этом коэффициент санитарной надежности в формуле (1) был принят равным 1,25 и предельная потеря напора согласно требованиям СНиП 3 м.

Далее была на основе формул (5) и (6) составлена программа для вычислительной машины ЕС-1022. При этом заданными величинами явились скорости фильтрования 6, 8, 10, 12 и 15 м/ч, эквивалентные диаметры 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 и 1,1 мм и значения $\frac{C}{C_0}$ соответственно 0,03; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 и 0,3. Из опытных данных, применяя вышеизложенную методику, находились исходные параметры фильтрования, значения которых приведены в таблице 2.

Экспериментальные исследования проводились с водой после промышленных осветлителей со взвешенным осадком при эталонных скоростях фильтрования V^{*} = 10 м/ч. Концентрация взвешенных веществ в исходной воде составляла в среднем 6,7 мг/л, содержание взвеси в фильтрате не превышало 1,5 мг/л, средняя температура воды была 2 °С. Как следует из параллельных опытов, шлаковая и обе керамзитовые загрузки показали по всем параметрам более высокие результаты, чем кварцевый песок, причем наиболее эффективной оказалась загрузка из дробленого керамзита.

По расчетным данным ЭВМ были составлены номограммы для каждой загрузки. К примеру на фиг. 1 и 2 представлены ре-

зультаты расчета для кварцевого песка и дробленого керамзита.

Таблица 2

Исходные параметры фильтрования при параллельных опытах с разными загрузками

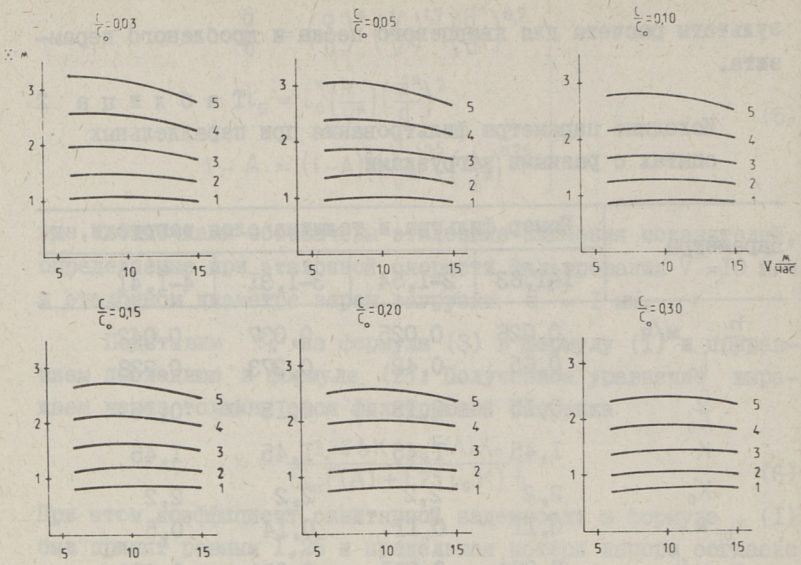
Параметры	Номер фильтра и толщина слоя загрузки, м			
	I–I,63	2–I,54	3–I,3I	4–I,4I
$\frac{h}{t}$, м/ч	0,026	0,025	0,037	0,042
i_0	0,65	0,42	0,273	0,338
$\frac{C}{C_0}$	0,I5	0,I5	0,I5	0,I5
K	I,45	I,45	I,45	I,45
X_0	2,2	2,2	2,2	2,2
x_0, м	0,II	0,II	0,I4	0,5
n, м/ч	0,024	0,03I	0,024	0,0I4
b, 1/м	20	20	I5,7	4,4
$\frac{a}{b}$, м/ч	0,0I6	0,02I	0,0I6	0,0I
$\frac{b}{a}$, ч/м	6I,3	47,4	6I,4	I04
F(A)	2,48	2,85	9,53	I2,9
1–A	0,385	0,369	0,249	0,226

По номограммам можно сделать следующие основные выводы:

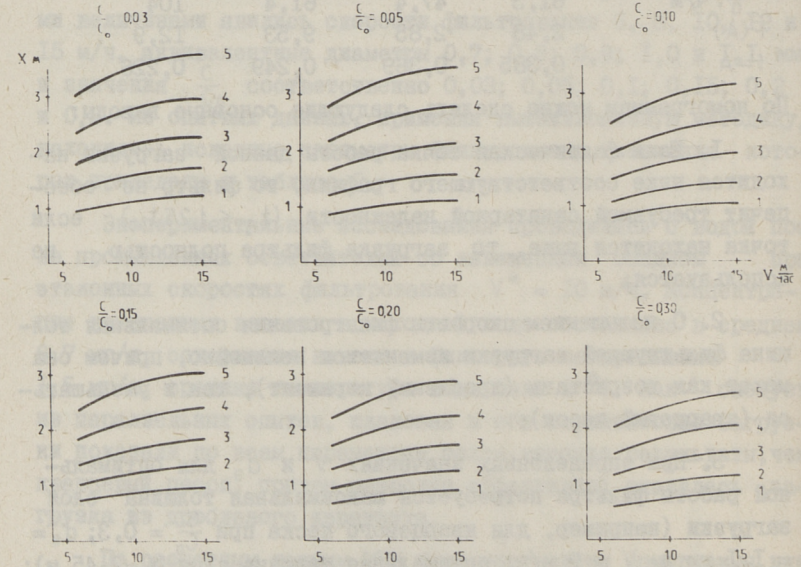
I. Если фактическая точка работы данной загрузки находится ниже соответствующего графика, то фильтр не обеспечит требуемой санитарной надежности ($t_з < 1{,}25\,t_н$), если точка находится выше, то загрузка фильтра полностью не используется;

2. С повышением скорости фильтрования оптимальная толщина фильтрующей загрузки изменяется нелинейно, причем она может как возрастать (дробленый керамзит), так и уменьшаться (кварцевый песок);

3. При определенных значениях V и $d_э$ для оптимальной работы фильтра потребуется максимальная толщина слоя загрузки (например, для кварцевого песка при $\frac{C}{C_0} = 0{,}3$; $d_э =$ $= I{,}I$ мм и $V = 9$ м/ч; оптимальная толщина слоя $x = 2{,}45$ м);



Фиг. 1. Номограмма для определения оптимальной толщины слоя фильтрующей загрузки из кварцевого песка: 1 – $d_э$ = 0,7 мм; 2 – $d_э$ = 0,8 мм; 3 – $d_э$ = 0,9 мм; 4 – $d_э$ = 1,0 мм; 5 – $d_э$ = 1,1 мм.



Фиг. 2. Номограмма для определения оптимальной толщины слоя фильтрующей загрузки из дробленого керамзита.

4. Влияние диаметра зерен загрузки на оптимальную толщину слоя возрастает с увеличением диаметра (при малых диаметрах уменьшается разброс и уклон графиков).

Приведенные номограммы позволяют проводить технико-экономическое сравнение вариантов выбора загрузки скорых фильтров, они могут быть использованы для сравнения технологической эффективности разных загрузок как при проектировании новых, так и при реконструкции существующих фильтров. Для получения более полной информации аналогичные графики необходимо иметь для разных периодов года.

Литература

1. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. М., 1964, с. 144-154.

2. Минц Д.М., Мельцер В.З. Упрощенный метод технологического моделирования процесса фильтрования. – Научные труды АКХ, 1973, вып. 98, ОНТИ АКХ, с. 57-60.

3. Мельцер В.З. К расчету темпа прироста потери напора на водоочистных фильтрах. – Научные труды АКХ, 1977, вып. 141, ОНТИ АКХ, с. 64-70.

J. Karu

Problems of Optimizing the Filter Material in Rapid Filters

Summary

This article deals with problems of optimizing the material used in rapid filters from the point of view of the parameters of the particles of the used material, thickness of the layer of filtration and velocity of filtration. Taking into account the results of technological modelling nomograms have been drawn for choosing the thickness of the layer of filtration that enables optimal work of the filter. The using of nomograms enables to compare technical-economical characteristics of different materials used in filters and it can be used as the basis in construction of new filters and reconstruction of those that are used now.

№ 505
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
УДК 551.482

В.Р. Вийес, А.Г. Каск

ПРИМЕНЕНИЕ БАКТЕРИОФАГА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДОБЕГАНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ

В системах водообеспечения, где источником являются поверхностные воды (речная сеть), надо создать возможность оперативного регулирования режима работы гидроузлов. Это вызвано необходимостью оптимизации работы водоочистных сооружений в зависимости от качества поступаемой на них воды. Последнее означает, что подача воды к водозабору производится с учетом стоимости ее очистки.

Для достижения перечисленных целей необходимо знать время добегания воды в различных гидрологических условиях, от одного регулируемого узла системы до другого, а также от возможного источника аварийного загрязнения (мосты, хранилища нефтепродуктов и т.д.) до ближайшего регулируемого узла системы.

Применение бактериофага (далее просто фага) для таких работ в качестве трейсера основывается на выводах, изложенных в работах [1, 2]. Приведем ниже некоторые из них:

1) суспензия фага может достигать концентрации 10^{13} БОЕ/мл, что практически дает такую же степень разбавления, как и при применении радиоактивных изотопов;

2) фаги абсолютно безвредны для окружающей среды;

3) при работе с фагами нет необходимости в специальном оборудовании, изготовление суспензии фага дешево.

Объектом нижеописанных исследований являлась система водообеспечения г. Таллинна.

Время добегания в системе целесообразно представлять в виде зависимости

$$T_L = f(L, Q), \qquad (I)$$

где T_L – время добегания воды на расстояние L;
Q – расход в замыкающем створе.

Составляя такие зависимости хорошо использовать следующее уравнение [3]

$$\bar{v}_L = a \cdot \ln(b \cdot Q), \qquad (2)$$

где $\bar{v}_L$ – средняя скорость течения на рассматриваемом участке;
a, b – экспериментально определяемые параметры.

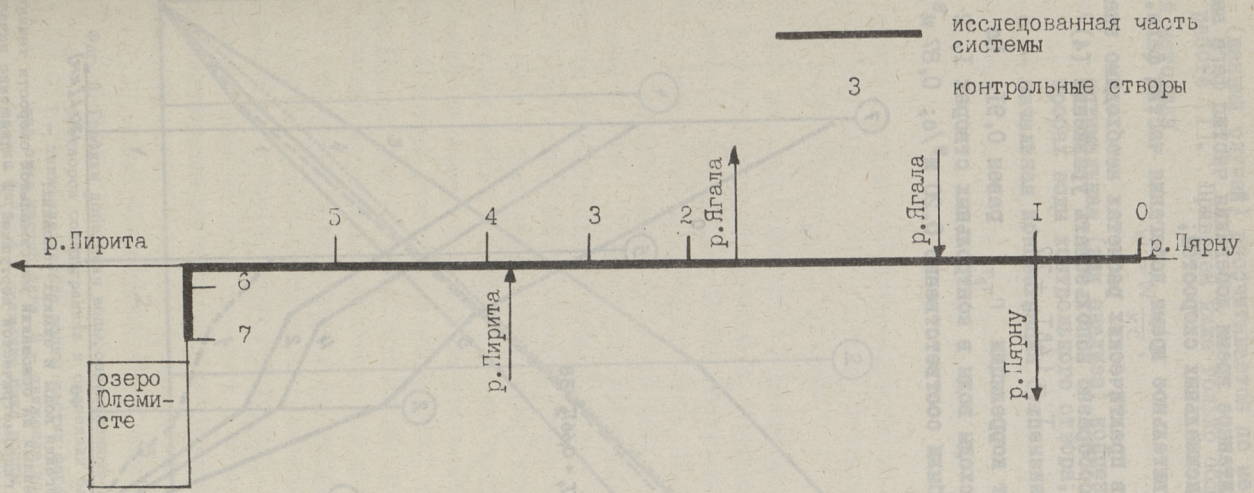
Для определения параметров a и b необходимо провести на изучаемых участках практическое определение времени добегания в однородных сезонных условиях, но при разных расходах воды.

В данной статье представляются только графические результаты экспедиционных работ, поскольку исследования имеют сезонный характер и еще продолжаются.

На фиг. I представлена схематически изучаемая система водообеспечения г. Таллина. В данной системе было проведено две экспедиции с применением бактериофага F-52. Кроме того, в 1978 году были проведены параллельные опыты с различными трейсерами на другом водном объекте.

Первая экспедиция проходила в условиях сложного ледяного покрова. Для определения ориентировочного времени взятия проб воды (с целью определения концентрации фага), было произведено предварительное измерение максимальной скорости течения гидрометрической вертушкой. Данная работа производилась между контрольными створами 0 и I (см. фиг.I) с интервалами ~ I км. Было предположено, что так полученное время добегания воды совпадает с прибытием начала волны частиц фага. Это значило бы, что самые "быстрые" частицы фага движутся с максимальной скоростью течения. Однако результаты исследований показали, что в действительности они движутся приближенно со средней скоростью течения (фиг. 2).

На основе данного опыта была установлена связь между фактическим движением начала волны фага и рассчитанным(основывается на максимальных скоростях течения)



Фиг. 1. Изученная при помощи бактериофага F – 52 часть системы водообеспечения г. Таллина.

$$T_p = 0{,}66 T_L - 3{,}8 , \qquad (3)$$

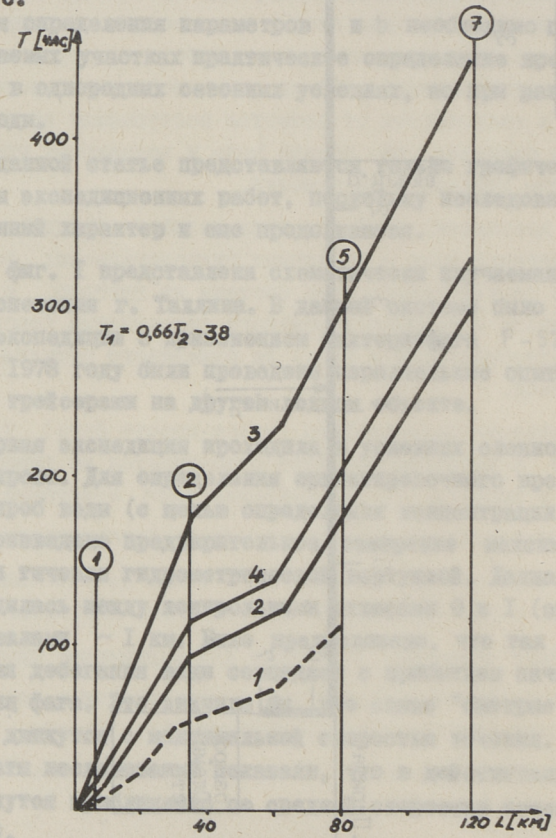
где T_p – рассчитанное время добегания частиц фага на основе максимальных скоростей;

T_L – действительное время добегания частиц фага.

Поскольку в практических расчетах необходимо знать величину T_L, целесообразно использовать уравнение (4)

$$T_L = 1{,}48 T_p + 7{,}2 . \qquad (4)$$

Коэффициент корреляции $r_{T_p T_L}$ равен 0,91. Во время эксперимента расходы воды в контрольных створах I, 2 и 7 (см. фиг. I,2) были соответственно 0,20 м^3/с; 0,87 м^3/с и I,37 м^3/с.



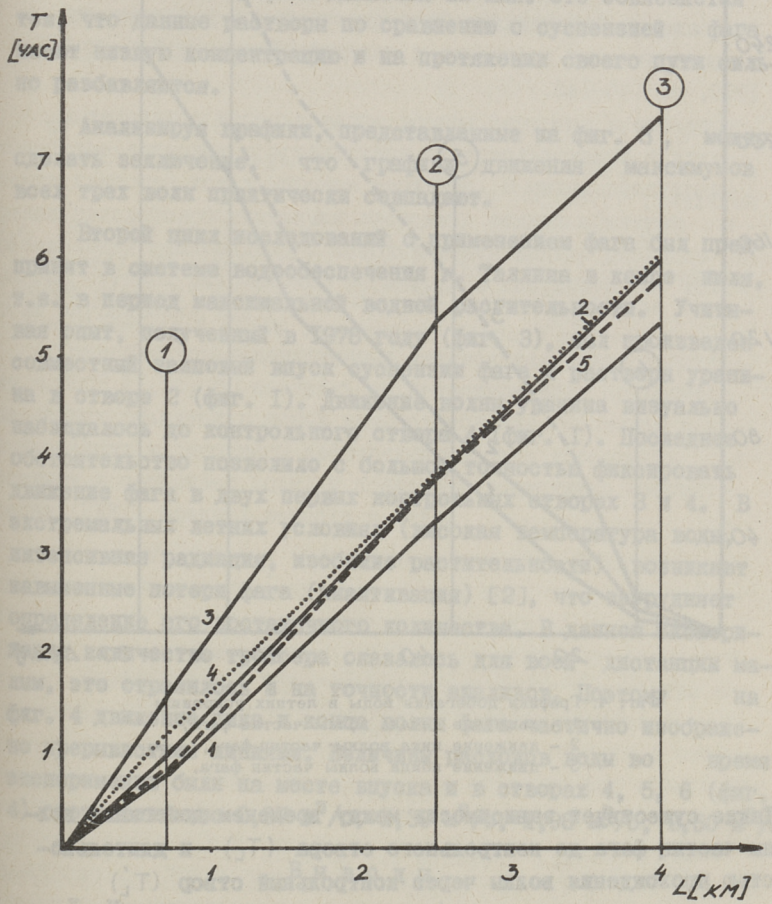
Фиг. 2. Графики добегания воды в зимних условиях:
1 – определенный на основании максимальной скорости течения, измеренной гидрометрической вертушкой, 2 – движение начала волны частиц фага, 3 – движение конца волны частиц фага, 4 – движение пика волны частиц фага.

Расчет необходимого количества фага при залповом впуске w (данный случай) рассчитывается по методике, изложенной в работе [I]. Приведем ниже только общую формулу из данной методики

$$w = W \frac{c'}{kc}, \qquad (5)$$

где c' – оптимальная (для анализа) концентрация фага в пробах воды контрольного створа;

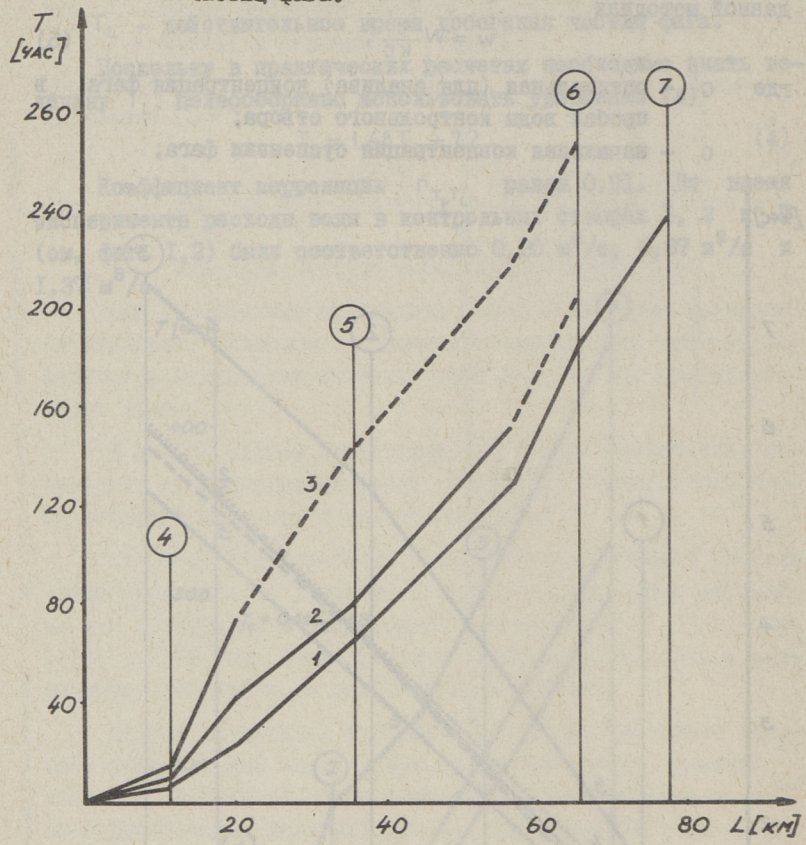
c – начальная концентрация суспензии фага;



Фиг. 3. Графики добегания воды, определенные при помощи растворов соли, уранина и суспензии бактериофага, 1 – движение начала волны частиц фага, 2 – движение пика частиц фага, 3 – движение конца волны частиц фага, 4 – движение пика волны раствора соли, 5 – движение пика волны раствора уранина.

K – коэффициент убытия фага 0,3–0,7;

W – объем воды, с которым происходит смешивание частиц фага.



Фиг. 4. Графики добегания воды в летних условиях:
1 – движение начала волны частиц фага,
2 – движение пика волны частиц фага,
3 – движение конца волны частиц фага.

Также существует зависимость между временем добегания волны частиц фага до контрольного створа (T_L) и длительностью прохождения волны через контрольный створ (T'_L)

$$T'_L = sT_L , \qquad (5)$$

где s – коэффициент, характеризующий меандрирование и неравномерность русла реки, имеет значения в пределах 0,3–I,0.

Для разработки методики точного определения движения волны фага на коротких участках водотока и сравнения различных трейсеров были проведены опыты на четырехкилометровом участке с практически постоянным расходом. Расходы воды в створах I и 3 (фиг. 3) были соответственно 0,89 $м^3/с$ и I,0I $м^3/с$. На фиг. 3 для волн растворов соли и уранина представлены только графики движения их пик. Это объясняется тем, что данные растворы по сравнению с суспензией фага имеют низкую концентрацию и на протяжении своего пути сильно разбавляются.

Анализируя графики, представленные на фиг. 3, можно сделать заключение, что графики движения максимумов всех трех волн практически совпадают.

Второй цикл исследований с применением фага был предпринят в системе водообеспечения г. Таллина в конце июля, т.е. в период максимальной водной растительности. Учитывая опыт, полученный в I978 году (фиг. 3), был произведен совместный залповый впуск суспензии фага и раствора уранина в створе 2 (фиг. I). Движение волны уранина визуально наблюдалось до контрольного створа 4 (фиг. I). Последнее обстоятельство позволило с большой точностью фиксировать движение фага в двух первых контрольных створах 3 и 4. В экстремальных летних условиях (высокая температура воды, интенсивная радиация, изобилие растительности) возникают завышенные потери фага (инактивация) [2], что затрудняет определение его достаточного количества. В данном эксперименте количество трейсера оказалось для всей дистанции малым, это отразилось и на точности анализов. Поэтому на фиг. 4 движение пика и конца волны фага частично изображено прерывистыми линиями. Величины расходов воды во время эксперимента были на месте впуска и в створах 4, 5, 6 (фиг. 4) соответственно 0,87 $м^3/с$; I,39 $м^3/с$; I,98 $м^3/с$; 2,50 $м^3/с$.

Выводы

I. Используя с высокой концентрацией суспензию фага можно при однократном впуске производить изучение речной системы с общей протяженностью трассы I00 км и более.

2. Составление аналитических зависимостей, типа $T_L = f(L,Q)$, для непосредственного вычисления времени добегания возможно используя формулу (2) и результаты многократных сезонных трассировок.

Литература

I. Каск А.Г. Применение бактериофагов в гидрологических исследованиях. Экспериментальные исследования гидрологических процессов и явлений. Часть 2. Изд-во МГУ, 1979, с. 140-142.

2. Kinnunen, K. Tracing water movement by means of Escherichia coli bacteriophages. Vesihallitus. Helsinki, 1978. 50 p.

3. White, K.E., Lee, P.J., Belcher, A.S. Accidental pollution of rivers: prediction of time-of-travel and the duration of countermeasures. Support Paper. River Pollution Control Conference. Water Research Centre USA, 1979, pp. 1-16.

A. Viies, A. Kask

The Use of Bacteriophages for the Definition of the Time of Water Flow in the Intake System

Summary

This article presents the methods of defining the time of water flow in the water intake system using bacteriophages. The article also presents the results of winter and summer expeditions in Tallinn water intake system.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 614.30-07

А.А. Ляэне, А.Э. Саава

АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ САНИТАРНО-МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОРСКОЙ ВОДЫ В ЗОНАХ РЕКРЕАЦИИ

Интенсивное использование водных ресурсов в народном хозяйстве приводит к ограничению их использования и ухудшению качества вод в мировом масштабе. В целях предупреждения дальнейшего ухудшения состояния водных объектов и обеспечения рационального использования водных ресурсов во многих странах разработаны нормативные документы по контролю загрязнения вод.

Согласно водно-санитарному законодательству, принятому в СССР [1, 2, 3], контроль за качеством воды проводится на водных объектах в зонах водопользования. По видам водопользования установлены дифференцированные требования к составу и свойствам воды, и предельно-допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воде.

Во многих странах (США, Великобритания, Голландия и др.) прежде всего проводится контроль всех точечных источников сброса загрязняющих веществ. Для них разрабатывают предельно-допустимые сбросы (ПДС), основанные на технологических возможностях. ПДС устанавливают общее количество загрязняющих веществ, допускающихся к сбросу за определенный период времени, и концентрацию загрязняющих веществ в выбрасываемом потоке. ПДС разрабатываются отдельно для коммунальных источников сброса, для промышленных и некоторых сельскохозяйственных источников по категориям и подкатегориям производства. Такой подход к контролю загрязнения обеспечивает более справедливое распределение затрат на очистку стока для разных экономических источников загрязнения внутри одной и той же категории (подкатегории), хотя требования

к качеству воды в водоеме допускают существенное дополнительное загрязнение. Другими причинами введения такого, технологически обоснованного подхода являются: трудности в соотнесении влияния на качество воды отдельных источников сброса; трудности во внедрении контроля, основанного на нормативах качества воды в зонах водопользования; проблемы, связанные с разработкой системы контроля загрязнения для всех источников загрязнения.

Наряду с ПДС предусматриваются и стандарты, которые определяют качество воды в зонах водопользования. Для каждого вида водопользования через критерии дается специфическая количественная величина, которая должна быть соблюдена, для достижения норм. Если ПДС, основанные на технологии, не обеспечивают местные требования в отношении качества воды в зоне водопользования, то устанавливают более строгие ПДС. Стандарты качества воды в водоеме ни в коем случае не могут быть причиной снижения требований к технологическим ПДС.

Одним видом полезного использования морских вод является рекреация. Специфическим критерием этого вида водопользования следует считать санитарно-микробиологические показатели качества воды, так как они являются более чувствительными и тонкими индикаторами хозяйственно-бытового загрязнения воды, чем химические и биологические. Основной целью санитарно-микробиологических исследований воды является ее оценка с точки зрения инфекционной опасности для человека. Современный методический уровень позволяет достаточно успешно вести поиск ряда возбудителей инфекций в воде. Однако практически лаборатории пока не в состоянии осуществлять повседневный контроль за наличием в водных объектах одновременно всех потенциальных возбудителей заболеваний. Поэтому текущий контроль за качеством воды включает косвенные приемы, в основу которых положено определение степени загрязнения воды экспертами человека и животных по санитарно-показательным микроорганизмам. В качестве последних были предложены все микроорганизмы – постоянные обитатели кишечника человеческого и животных организмов: кишечная палочка, энтерококки, бифидобактерии, аэромонады, клостридии, протеи, бактериофаги.

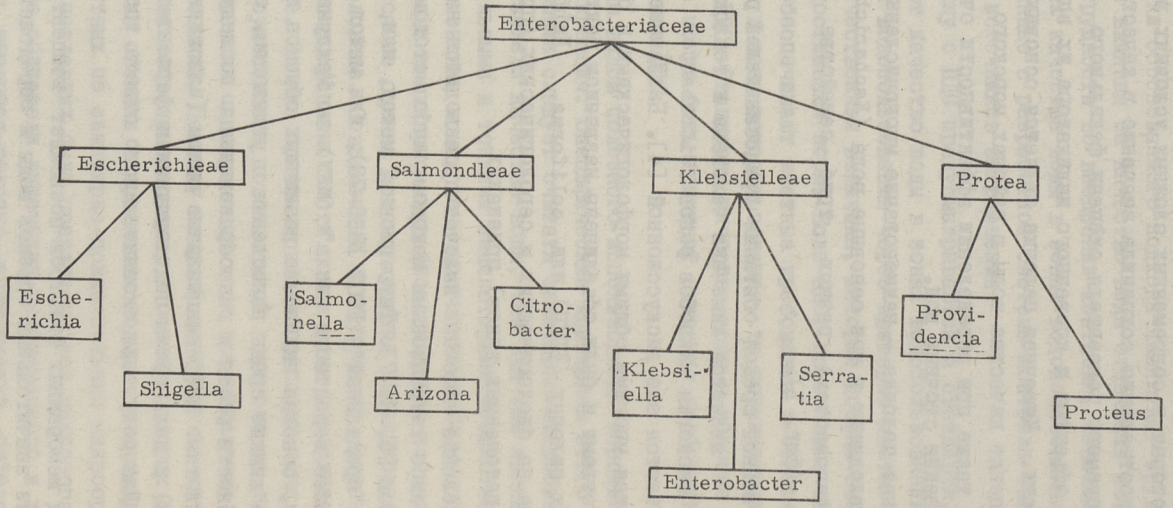
Наиболее признанным и распространенным во всем мире санитарно-показательным микроорганизмом является кишечная палочка, которая в современных сложных условиях водопотребления и водоотведения сохранила значение в качестве основного нормируемого показателя степени фекального загрязнения водных объектов и косвенного индикатора их эпидемической опасности. Кишечная палочка является основным критерием при оценке качества воды в районах морского водопользования, а также при определении эффективности очистки и обеззараживания сточных вод.

Кишечная палочка - наименование многочисленной группы микробов, входящих в три основные рода (Escherichia, Citrobacter, Enterobacter) разных триб семейства Enterobacteriaceae (фиг. I).

Естественной средой обитания представителей рода Escherichia является кишечник человека и теплокровных животных, но экология микробов родов Citrobacter и Enterobacter остается еще дискуссионной [4]. Названные роды характеризуются многими общими морфологическими и биологическими свойствами и были объединены названием бактерии группы кишечных палочек (БГКП) или coliforms. Дифференциация их основана на биологических и серологических (преимущественно для патогенных видов) признаках.

Определение кишечных палочек производится на равном основании либо титрационным методом, либо методом мембранных фильтров [5, 6, 7]. Титрационный метод, или, как его называют, "бродильный" (ГОСТ I896-73), или метод определения "наиболее вероятного числа" (MPN) по Международным стандартам, основан на посеве различных объемов исследуемой воды в жидкие среды накопления с углеводом, определении способности роста и газообразования с последующим высевом на плотные дифференциальные среды (или жидкие с ингибиторами) и дальнейшим подтверждением ферментативной способности. Для получения окончательного ответа требуется 3-4 суток.

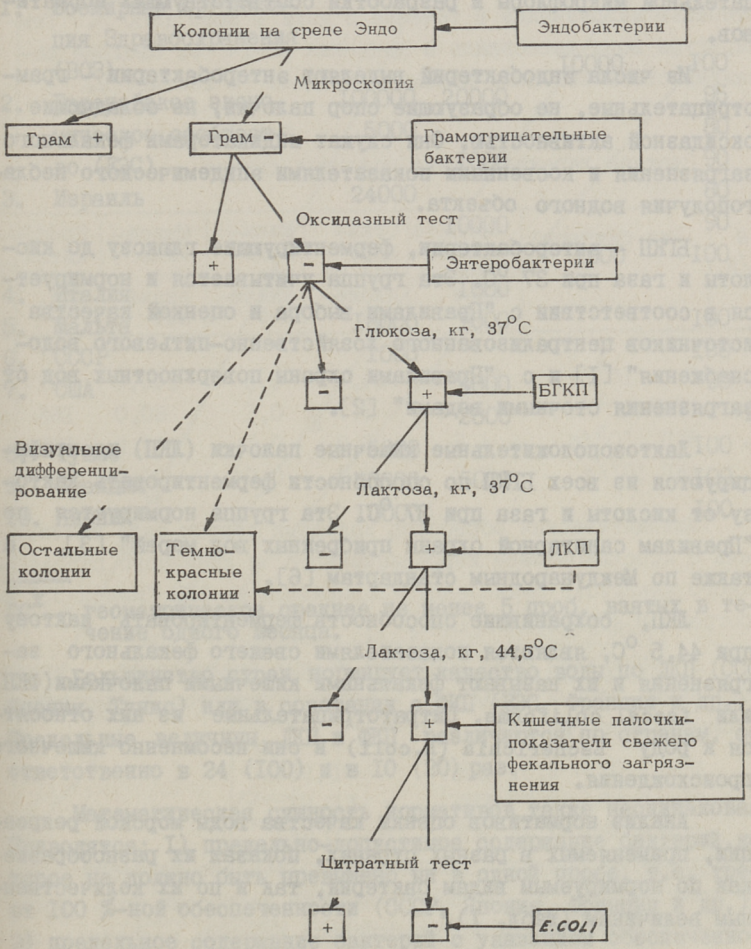
Метод мембранных фильтров позволяет концентрировать бактерии из значительных объемов воды и определять число выросших колоний (бактерий) в первичном посеве. По морфологии колоний на фильтрах, особенно в сочетании с быстрыми



Фиг. 1. Схема семейства Enterobacteriaceae.

дифференциальными тестами (микроскопия, оксидазный и др.) можно получить окончательный ответ уже через 24 часа [8]. Метод мембранных фильтров весьма экономичен, сокращает потребность в бактериологической посуде, питательных средах, реактивах, существенно уменьшает объем работы по анализу. Как показано многочисленными исследованиями, этот метод наиболее пригоден для исследования морской воды.

Дифференциальной средой для кишечных палочек является среда Эндо.



Фиг. 2. Схема дифференцирования бактерий, вырастающих в среде Эндо.

На фиг. 2 представлена, характеризующая микрофлору, вырастающую на этой среде при 37 °С [8]. Все бактерии, вырастающие на среде Эндо в течение 24 часов – эндобактерии (Э). Они представлены в основном грамотрицательной микрофлорой и рассматриваются как важный показатель процесса самоочищения. Кроме того, в последние годы увеличилась роль грамотрицательных бактерий в оценке паталогии человека. Возможное присутствие среди них условнопатогенных видов требует контроля качества воды в отношении неспороносной грамотрицательной микрофлоры и разработки соответствующих нормативов.

Из числа эндобактерий выделяют энтеробактерии – грамотрицательные, не образующие спор палочки, не обладающие оксидазной активностью. Они служат индикаторами фекального загрязнения и косвенными показателями эпидемического неблагополучия водного объекта.

БГКП – энтеробактерии, ферментирующие глюкозу до кислоты и газа при 37 °С. Эта группа учитывается и нормируется в соответствии с "Правилами выбора и оценкой качества источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения" [I] и с "Правилами охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами" [2].

Лактозоположительные кишечные палочки (ЛКП) идентифицируются из всех БГКП по способности ферментировать лактозу от кислоты и газа при 37 °С. Эта группа нормируется по "Правилам санитарной охраны прибрежных вод морей" [3], а также по Международным стандартам [6].

ЛКП, сохранившие способность ферментировать лактозу при 44,5 °С, являются показателями свежего фекального загрязнения и их называют фекальными кишечными палочками (ФКП) или faecal coliforms. Цитратотрицательные из них относятся к роду Escherichia (E.coli) и они несомненно кишечного происхождения.

Анализ нормативов оценки качества воды морской рекреации, применяемых в разных странах, показал их разнообразие как по нормируемым видам бактерий, так и по их количественным величинам (табл. I).

Таблица I

Нормативы оценки качества морской воды в зонах рекреации [3,9 - I2]

№ п/п	Страна или организация	Предельное содержание бактерий в I л			Обеспеченность норматива, %
		ЛКП	ФКП	E.coli	
I.	Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ)			I0000	I00
2.	Европейское экономическое сообщество (ЕЭС)	I00000 5000	20000 I000		95 80 90
3.	Израиль	24000	 I0000	 I000	80 90 I00
4.	Италия		I000		
5.	Мальта	I8000	I000		I00
6.	СССР	I000			I00
7.	США		4000 2000		90 ГС[x]
8.	Тунис	5000			I00
9.	Франция	20000	5000		I00
I0.	Япония	I0000			I00

ГС[x] - геометрическое среднее не менее 5 проб, взятых в течение одного месяца.

Большинство стран нормирует качество воды по ЛКП (СССР, Япония, Тунис) или в сочетании с ФКП (ЕЭС, Франция и др.). Предельные величины ЛКП и ФКП различаются по странам, соответственно в 24 (I00) и в I0 (20) раз.

Математическая сущность нормативов также неодинаковая. Приводятся: I) предельно-допустимое содержание бактерий, которое не должно быть превышено ни в одной пробе, т.е. требуют I00 %-ной обеспеченности (СССР, Япония, Франция и др.); 2) предельное содержание бактерий с указанием обеспеченнос-

ти и частоты взятия проб (ЕЭС, США); 3) геометрическое среднее с указанием требуемого числа проб (США).

В целях сопоставления между собой разных нормативов по нормируемым бактериям их количественные величины были переведены на условную единую основу. Основой было выбрано число эндобактерий как первое звено в схеме дифференциации кишечных палочек. Для этого были параллельно определены в 55 пробах морской воды следующие показатели – Э, БГКП, ЛКП и ФКП. Пробы были взяты в пунктах с различной степенью загрязнения в течение 3 дней в июле 1980 г. Температура воды колебалась в пределах 10–14 °С. Сводная характеристика исходных данных приведена в таблице 2.

Таблица 2

Сводная характеристика исходных данных

№ п/п	Вид бактерий	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Минимальное значение	Максимальное значение	Коэффициент вариации, %
1.	Э 10^3/л	14,9	24,0	0,3	140,0	161
2.	БГКП 10^3/л	5,8	9,7	0,1	60,0	166
3.	ЛКП 10^3/л	4,5	7,9	0,1	54,9	177
4.	ФКП 10^3/л	2,2	5,0	0,04	36,0	232

Математическая обработка исходных данных была произведена с использованием корреляционного и линейного регрессионного анализов. Вычисления проводились на ЭВМ "Минск-32" по программам КОМД и ЛИРЕ [13].

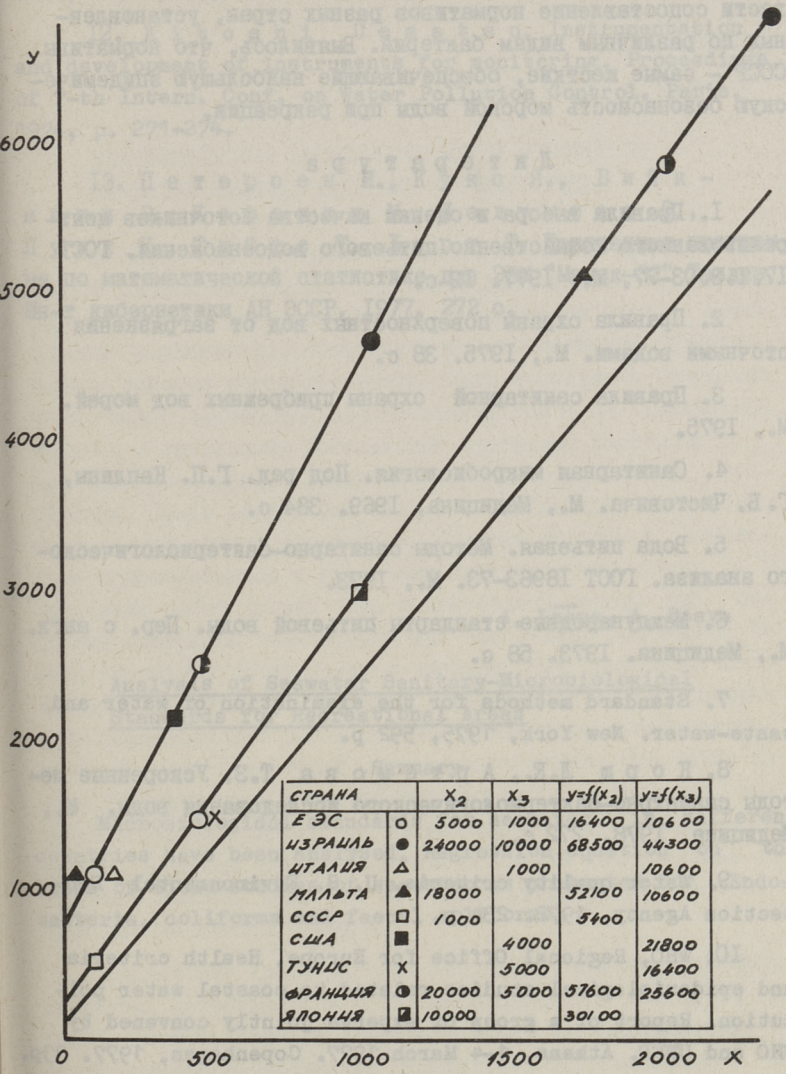
В результате были выявлены тесные взаимосвязи между изучаемыми видами бактерий, которые отражаются следующими уравнениями регрессии:

$$Э = 1,07 + 2,39\ БГКП \qquad r = 0,96;$$
$$Э = 2,63 + 2,75\ ЛКП \qquad r = 0,91;$$
$$Э = 6,86 + 3,74\ ФКП \qquad r = 0,78,$$

где численная величина показывает количество бактерий в миллилитре. По приведенным уравнениям регрессии было произведено перечисление количественных величин нормативов на

единую основу, т.е. количество. Результаты представлены на фиг. 3.

Сравнение нормативов по ЛКП и ФКП одной и той же страны показывает относительно хорошее их совпадение в странах



СТРАНА		X_2	X_3	$y=f(x_2)$	$y=f(x_3)$
ЕЭС	○	5000	1000	16400	10600
ИЗРАИЛЬ	●	24000	10000	68500	44300
ИТАЛИЯ	△		1000		10600
МАЛЬТА	▲	18000		52100	10600
СССР	□	1000		5400	
США	■		4000		21800
ТУНИС	X		5000		16400
ФРАНЦИЯ	◑	20000	5000	57600	25600
ЯПОНИЯ	◪	10000		30100	

Фиг. 3. График сравнения отдельных нормативных показателей. На абсциссе X_1 – БГКП, X_2 – ЛКП, X_3 – ФКП и на ординате Y – Э штук в литре.

ЕЭС и Израиле. Значительные разницы были выявлены в нормативах Франции и Мальты. Во всех случаях нормативы по ФКП условно более жесткие, чем по ЛКП.

Приведенные графики (фиг. 3) позволяют также произвести сопоставление нормативов разных стран, установленных по различным видам бактерий. Выявилось, что нормативы СССР - самые жесткие, обеспечивающие наибольшую эпидемическую безопасность морской воды при рекреации.

Литература

I. Правила выбора и оценки качества источников централизованного хозяйственно питьевого водоснабжения. ГОСТ I7.I.3.03-77, М., I977. I2 с.

2. Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. М., I975. 38 с.

3. Правила санитарной охраны прибрежных вод морей. М., I975.

4. Санитарная микробиология. Под ред. Г.П. Каплины, Г.Б. Чистовича. М., Медицина, I969. 384 с.

5. Вода питьевая. Методы санитарно-бактериологического анализа. ГОСТ I8963-73. М., I973.

6. Международные стандарты питьевой воды. Пер. с англ. М., Медицина. I973. 58 с.

7. Standard methods for the examination of water and waste-water. New York, 1975, 592 p.

8. Корш Л.Е., Артемова Т.З. Ускоренные методы санитарно-бактериологического исследования воды. М., Медицина, I978. 272 с.

9. Water quality criteria. U. S. Environmental Protection Agency, 1972. 234 p.

I0. WHO, Regional Office for Europe, Health criteria and epidemiological studies related to coastal water pollution. Report of a group of experts jointly convened by WHO and UNEP. Athens, 1-4 March 1977. Copenhagen, 1977. 33p.

II. WHO Regional Office for Europe. Monitoring of recreational coastal water quality and shellfish culture areas. Report of a seminar jointly convened by WHO and UNEP. Rome, 4-7 April, 1978. Copenhagen, 1978. 39 p.

I2. Kitoshi Uematsu. Instrumentation and development of instruments for monitoring. Proceedings of 7-th Intern. Conf. on Water Pollution Control. Paris, 1974, p. 271-274.

I3. Петерсен И., Кукс Я., Вийкманн Э., Каролин М., Лелумеэс Э., Пукк К., Тийтс Т., Хурт Т. Прикладные программы по математической статистике для ЭВМ "Минск-32" Таллин, Ин-т кибернетики АН ЭССР, 1977. 272 с.

A. Lääne, A. Saava

Analysis of Seawater Sanitary-Microbiological Standards for Recreational Areas

Summary

Microbiological standards for seawater in different countries have been analysed. Regression equation on the bases of field studies of seawater is presented for Endobacteria, coliforms and faecal coliforms.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 614.30-07

А.Л. Вызу, А.А. Ляэне

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НЕКОТОРЫМИ КАЧЕСТВЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МОРСКОЙ СРЕДЫ

В 1974 году в связи с разработкой новых правил санитарной охраны прибрежных вод морей значительно изменились границы района водопользования. Чтобы разработать комплексные мероприятия, обеспечивающие нормативное качество воды в районах водопользования, была составлена программа комплексных научно-исследовательских работ на Таллинском заливе. В выполнении комплексной программы участвовали все заинтересованные ведомства и научные заведения республики. Целью этих работ является определение тех границ нагрузки на водную экосистему, которые позволяют экосистеме приспособиться к изменению характеристик среды. В ходе этих работ должны быть подготовлены основы для создания программы мониторинга для прибрежных вод морей. По этой программе до настоящего времени были проведены шестнадцать экспедиций на Таллинском заливе. Из них первые семь характеризуют распределение качественных параметров морской воды при старой системе канализации при более пятидесяти береговых выпусках сточных вод, а последние при реконструированной системе канализации с глубоководным выпуском. В данной статье приводится анализ качественных параметров морской воды при не реконструированной системе канализации города Таллина.

Экспедиции для выяснения сезонных и пространственных изменений качества воды в заливе проводились три раза в год — весной, сразу после схода льда, для определения распределения качественных параметров, образовавшихся в заливе в зимних условиях, когда залив покрыт льдом и водообмен незначительный; летом при образовавшемся термо-

клине и осенью в условиях полного перемешивания воды по вертикали.

В ходе каждой экспедиции были определены 17 химических и микробиологических показателей в среднем в 70 пространственных пунктах залива плюс соответственные биологические показатели.

Для изучения пространственно-временной структуры поля загрязнения определены интервалы наиболее вероятных значений концентрации разных ингредиентов, оценены эмпирические законы распределения и вычислены корреляционные матрицы для компонентов случайного вектора. Проведенный анализ должен показать, отражает ли существующая сетка отбора проб и частота экспедиций адекватно состояние залива.

Из литературы известно, что корреляционная связь между параметрами считается достоверной при

$$\frac{n-N}{N} \geqslant 20,$$

где n – число наблюдений;

N – число переменных параметров в уравнении регрессии.

Из этого неравенства видно, что хотя у нас объем экспедиции довольно большой, общее количество данных все равно недостаточно, чтобы их статистически обрабатывать в каждой точке сезонно. Поэтому на первом этапе мы должны ограничиться рассмотрением средних значений по экспедициям. Таким образом, полученные осредненные результаты применимы для определения трендов изменения отдельных качественных параметров воды в заливе. Для обработки массивов данных использовался пакет прикладных программ по математической статистике для ЭВМ "Минск-32" [1]. По программе КОМД вычислялись основные статистики компонента случайного вектора, его корреляционная матрица и доверительные интервалы для элементов корреляционной матрицы. По программе СОПР происходило определение и графическое представление одномерных эмпирических распределений и сопоставление их с различными теоретическими распределениями.

Статистическому анализу подвергались следующие переменные: X_1 – температура (°С); X_2 – кислород (мг/л); X_3 – pH; X_4 – соленость (в ‰); X_5 – взвешенные вещества (мг/л);

X_6 – БПК$_5$ (мг/л); X_7 – NH_4^+ (мг/л); X_8 – NO_2^- (мг/л); X_9 – NO_3^- (мг/л); X_{10} – PO_4^- (мг/л); X_{11} – $P_{общ}$ (мг/л); X_{12} – сапрофиты при 37 °С; X_{13} – сапрофиты при 20 °С; X_{14} – эндобактерии; X_{15} – оксидазоотрицательные кишечные палочки; X_{16} – лактозоположительные кишечные палочки (ЛКП); X_{17} – энтерококки (Э).

Для этих переменных вычислялись средние значения с нижней и верхней границами 95 % доверительного интервала, стандартные отклонения с нижней и верхней границами 95 % доверительного интервала, размах (минимальное и максимальное значение), коэффициент вариации, асимметрии и эксцесс.

Сравнение таблиц основных статистик показывает, что температура, кислород, pH, соленость, взвешенные вещества и БПК$_5$ довольно равномерно распределены по заливу в пределах одной экспедиции. Сезонные изменения в концентрациях этих ингредиентов рассмотрены уже в работе [2].

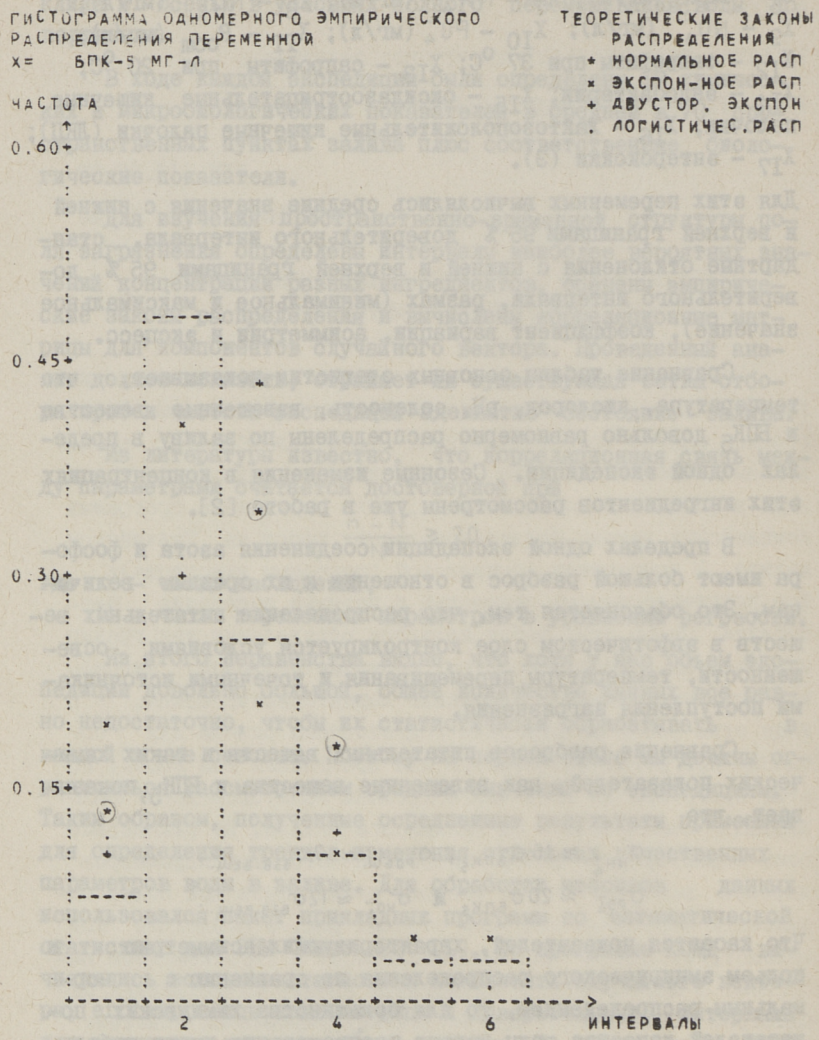
В пределах одной экспедиции соединения азота и фосфора имеют большой разброс в отношении к их средним величинам. Это объясняется тем, что распределение питательных веществ в эвфотическом слое контролируется условиями освещенности, температуры, перемешивания и точечными источниками поступления загрязнения.

Сравнение разбросов питательных веществ и таких химических показателей, как взвешенные вещества и БПК$_5$, показывает, что

$$\sigma_{NH_4^+} \approx 15\,\sigma_{БПК_5},\ \sigma_{Робщ.} \approx 7\,\sigma_{взв.вещ.},$$

$$\sigma_{PO_4^-} \approx 20\,\sigma_{БПК_5} \text{ и } \sigma_{NO_3^-} \approx 12\,\sigma_{взв.вещ.}.$$

Что касается показателей, характеризующих асимметрию и подъем эмпирического распределения по сравнению с нормальным распределением, то для большинства химических показателей качества воды кривые распределения имеют небольшую положительную асимметрию и отрицательный эксцесс. Из этого следует, что большинство эмпирических распределений химических показателей для всех сезонов можно приблизить к нормальному распределению. В качестве примера представим гистограмму распределения БПК$_5$ (фиг. I).



Фиг. 1. Гистограмма одномерного эмпирического распределения переменной X_6 = БПК$_5$(мг/л).

Таблица I

Корреляционная матрица отдельных ингредиентов

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
X_2	-0,35															
X_3	0,48	0,48														
X_4	-0,89	0,40	-0,II													
X_5	-0,26	-0,I0	-0,2I	0,28												
X_6	0,34	-0,47	-0,43	-0,56	-0,0I											
X_7	0,27	-0,60	-0,50	0,43	0,I4	0,79										
X_8	0,I8	-0,6I	-0,52	-0,35	-0,75	0,75	0,83									
X_9	-0,05	-0,72	-0,76	-0,28	0,22	0,62	0,70	0,63								
X_{10}	-0,26	-0,43	-0,55	0,I6	0,49	0,36	0,49	0,5I	0,6I							
X_{11}	-0,I6	-0,59	-0,37	-0,0I	0,30	0,I9	0,33	0,30	0,55	0,5I						
X_{12}	0,I6	-0,70	-0,55	-0,39	0,2I	0,68	0,8I	0,74	0,73	0,63	0,40					
X_{13}	0,I7	-0,83	-0,50	-0,4I	0,I5	0,59	0,7I	0,66	0,77	0,57	0,64	0,76				
X_{14}	0,I4	-0,28	-0,48	-0,30	0,22	0,48	0,37	0,37	0,46	0,34	0,36	0,45	0,4I			
X_{15}	0,I7	-0,I8	-0,46	-0,25	0,22	0,47	0,32	0,30	0,39	0,28	0,29	0,36	0,33	0,98		
X_{16}	0,II	-0,I7	-0,46	-0,25	0,2I	0,46	0,30	0,28	0,40	0,25	0,29	0,33	0,30	0,96	0,99	
X_{17}	0,II	-0,79	-0,56	-0,34	0,I5	0,68	0,8I	0,7I	0,72	0,57	0,46	0,83	0,83	0,38	0,33	0,3I

Микробиологические показатели качества воды в отношении к их средней величине по заливу имеют очень большой разброс по сравнению с химическими показателями и это для каждого сезона года. Например, $\sigma_{САПР.} \approx 1331\,\sigma_{ВЗВ.ВЕЩ.}$, $\sigma_{ЛКП} \approx 74\,\sigma_{БПК_5}$ и $\sigma_{Э} \approx 4675\,\sigma_{БПК_5}$.

Поэтому характеризовать микробиологическое состояние залива невозможно каким-то средним показателем. Величины микробиологических показателей зависят от расположения пункта отбора проб. Из анализа корреляционных матриц выявилось, что для всех сезонов хорошо коррелируются между собой микробиологические показатели воды. Учитываемая корреляционная связь существует между соединениями азота с сапрофитами и энтерококками ($r_{15,16} = 0{,}989$), $r_{14,15} = 0{,}961$, $r_{15,17} = 0{,}910$; $r_{14,16} = 0{,}943$).

В качестве примера представим одну корреляционную матрицу (табл. I).

В результате этой статистической обработки можно распределить залив на зоны с разной степенью загрязнения (антропогенного влияния), благодаря чему уменьшалось количество отбора проб. Ввиду большого разброса соединений азота, фосфора и микробиологических показателей их осреднить нельзя и требуется их дальнейший анализ в условиях работы глубоководного выпуска.

Литература

I. Петерсен И., Кукс Я., Вийкманн Э., Каролин М., Лелумеэс Э., Пукк К., Тийтс Т., Хурт Т. Прикладные программы по математической статистике для ЭВМ "Минск-32", Таллин, Ин-т кибернетики АН ЭССР, 1977. 272 с.

2. Ляэне А.А., Макаров В.В. Сезонные изменения некоторых показателей качества воды в Таллинском заливе. Материалы УI Всесоюзного симпозиума по современным проблемам самоочищения водоемов и регулирования качества воды. IУ секция, Таллин, I6-I8 апр. 1979 г., с. 2I-24.

A. Võsu, A. Läänе

Statistic Relations Between Some Parameters of the Water Quality in the Sea Environment

Summary

This article presents the results of statistic water quality parameters in the sea environment. The aim of the investigation is to provide background information relevent to the development of an appropriate programme to monitor.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.3

З.И. Якубовская

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД МЕТОДОМ ФЛОТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕВОГО СПОСОБА ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЕЙ ВОЗДУХА

Одним из основных веществ, загрязняющих сточные воды предприятий различного профиля, являются нефть и нефтепродукты. Поэтому проблема очистки сточных вод от нефтепродуктов является очень актуальной. В настоящее время считается, что одним из наиболее эффективных методов очистки таких вод является метод флотации. На эффективность флотационной очистки значительное влияние оказывают размер и количество введенных в воду пузырьков воздуха [3]. Создание во всем объеме жидкости, где взвешенные вещества находятся в мелкодисперсном состоянии, мелких воздушных пузырьков является необходимым условием для эффективной очистки сточных вод [1].

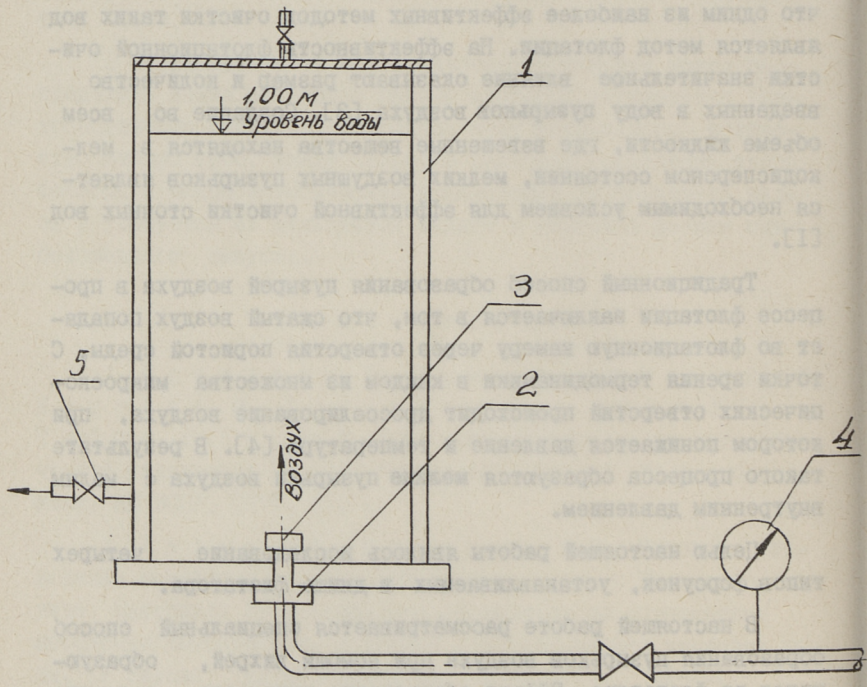
Традиционный способ образования пузырей воздуха в процессе флотации заключается в том, что сжатый воздух попадает во флотационную камеру через отверстия пористой среды. С точки зрения термодинамики в каждом из множества микроскопических отверстий происходит дросселирование воздуха, при котором понижается давление и температура [4]. В результате такого процесса образуются мелкие пузырьки воздуха с малым внутренним давлением.

Целью настоящей работы явилось исследование четырех типов форсунок, устанавливаемых в днище флотатора.

В настоящей работе рассматривается специальный способ образования пузырьков воздуха при помощи вихрей, образующихся во флотаторе. Эффект образования вихревого движения достигается за счет поступления воздуха во флотатор под дав-

лением 0,08–0,I МПа через установленные в днище флотатора форсунки. При испытании форсунки с несколькими слоями микросетки площадь сетки должна быть примерно на два порядка меньше площади сечения флотатора. При этом давление в пузырьке воздуха больше, чем в вихревой зоне [2, 5]. При достижении поверхности воды во флотаторе размеры вихревого шнура увеличиваются в несколько раз. В поверхностном слое большие пузырьки схлапываются и образуется мелкая пена. Противоток воды, насыщенный образованными мелкими пузырьками воздуха, из верхних слоев увлекает некоторый объем воды вниз, что способствует захвату частиц нефтепродуктов.

Для проведения экспериментов в лаборатории Рижского нефтемаслозавода использовалась модель флотатора (фиг. I), которая состоит из плексиглазового цилиндра (I) с вмонтированным в днище штуцером (2) для подачи воздуха на форсунку (3).



Фиг. 1. Схема опытной установки:
1 – плексиглазовый цилиндр; 2 – штуцер для подвода воздуха; 3 – форсунка; 4 – манометр; 5 – кран для отбора проб.

Воздух подается от сети компрессора. Давление воздуха контролируется манометром (4). Отбор проб производится через кран (5) на уровне форсунки.

Для проведения экспериментов применялись четыре варианта форсунок. Варианты были следующие:

I. Форсунка с металлическим конусом.

2. Форсунка с 4-слойным фильтром из микросетки.

3. Форсунка с двухслойным конусообразным фильтром.

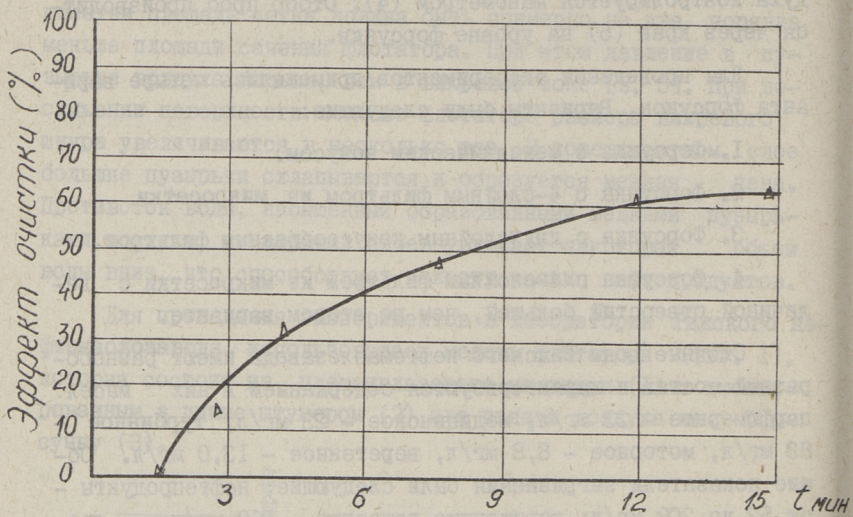
4. Форсунка с 4-слойным фильтром из микросетки с величиной отверстий большей, чем во втором варианте.

Сточные воды Рижского нефтемаслозавода имеют разнообразный состав и характеризуются содержанием в них масел: парфюмерное - 23 мг/л, медицинское - 23 мг/л, турбинное - 83 мг/л, моторное - 8,8 мг/л, веретенное - I3,0 мг/л. Общие показатели загрязнения были следующие: нефтепродукты - от 52 до 208 мг/л; взвешенные вещества - I60 мг/л; прозрачность - I,3-4,2 см; щелочность - 4,4-II мг-экв/л.

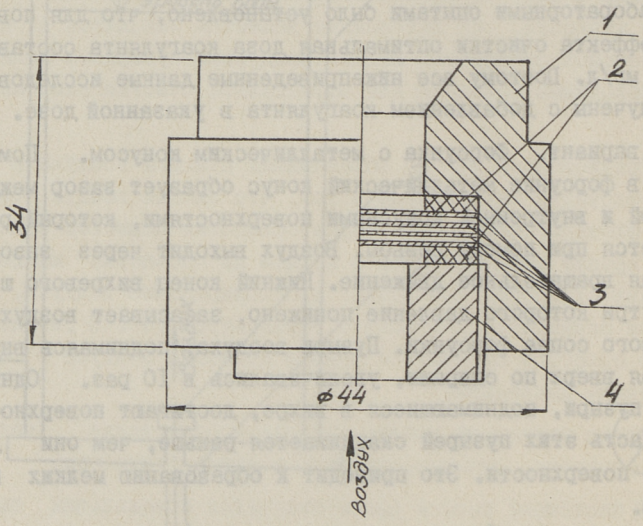
Лабораторными опытами было установлено, что для повышения эффекта очистки оптимальная доза коагулянта составляет I00 мг/л. Поэтому все нижеприведенные данные исследования получены с добавлением коагулянта в указанной дозе.

I вариант. Форсунка с металлическим конусом. Помещенный в форсунке металлический конус образует зазор между наружной и внутренней конусными поверхностями, который регулируется при помощи резьбы. Воздух выходит через зазор, совершая вращательное движение. Нижний конец вихревого шнура, внутри которого давление понижено, засасывает воздух из кольцевого сопла форсунки. Пузыри воздуха, поднимаясь внутри вихря вверх по спирали, увеличивались в I0 раз. Однако не все пузыри, поднимающиеся в вихре, достигают поверхности воды. Часть этих пузырей скапливается раньше, чем они достигнут поверхности. Это приводит к образованию мелких пузырьков.

При I5-минутной флотации был получен эффект очистки до 62 % (фиг. 2).

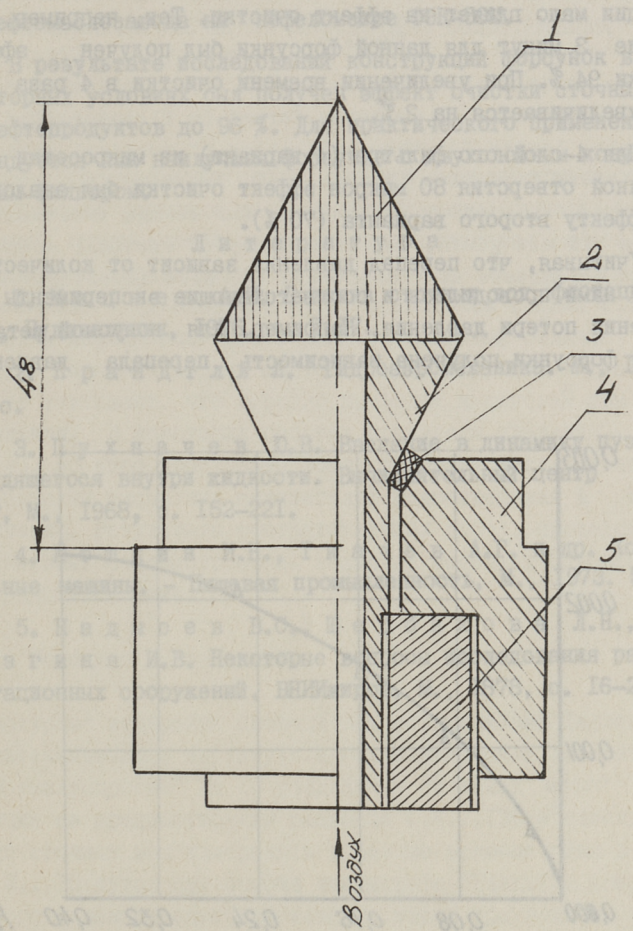


Фиг. 2. Зависимость эффекта очистки нефтесодержащих сточных вод от времени флотации.



Фиг. 3. Форсунка с четырехслойным фильтром:
1 – гайка; 2 – прокладка; 3 – микросетки;
4 – штуцер.

II вариант. Форсунка с четырехслойным фильтром (фиг. 3). Для установки в форсунке четырехслойного фильтра применялась микросетка с величиной отверстий 40 микрон и подавался воздух давлением 0,I МПа. При этом также наблюдался эффект засасывания воздуха в вихревой шнур. Эффект очистки для этого варианта составил 70 %.



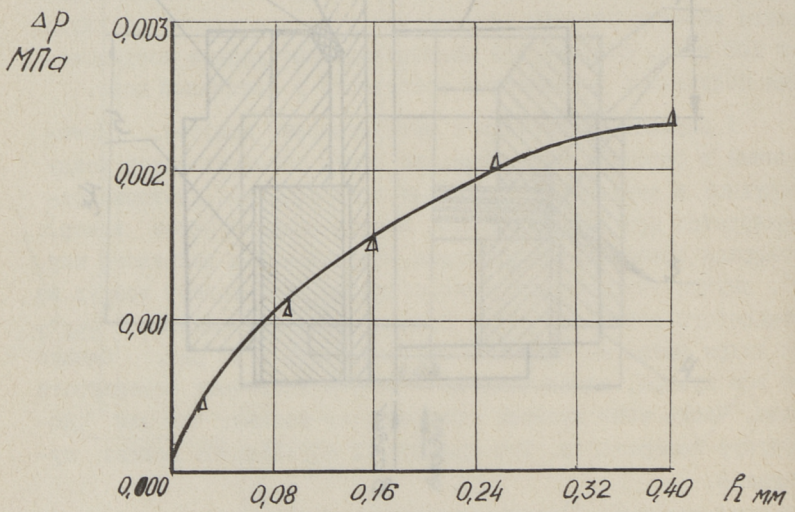
Фиг. 4. Форсунка с двухслойным конусообразным фильтром: 1 – двухслойный конусообразный фильтр; 2 – металлический конус; 3 – прокладка; 4 – гайка; 5 – штуцер.

III вариант. Для двухслойного конусообразного фильтра (фиг. 4) использовалась микросетка с величиной отверстия 40 микрон. При этом воздух проходил через отверстия I/3 верхней части конуса вертикально, образуя вихри с размерами пузырьков, аналогичными второму случаю.

Эффект очистки составил 96 %, причем продолжительность флотации мало влияет на эффект очистки. Так, например, в течение 3 минут для данной форсунки был получен эффект очистки 94 %. При увеличении времени очистки в 4 раза эффект увеличивается на 2 %.

Для 4-слойного фильтра (4 вариант) из микросетки с величиной отверстия 80 микрон эффект очистки был аналогичен эффекту второго варианта (70 %).

Учитывая, что перепад давления зависит от количества сеток, нами проводились и соответствующие эксперименты определения потери давления. Например, для конусной металлической форсунки получена зависимость перепада давлений



Фиг. 5. Перепад давлений в зависимости от величины зазора между конусом форсунки и конусообразным отверстием гайки.

ΔP от величины зазора h между конусом форсунки и конусообразным отверстием гайки (фиг. 5).

Для двухслойной конусной форсунки перепад давлений составляет 0,0015–0,002 МПа и дает лучшие результаты очистки.

Физико-химический анализ отбираемых проб сточных вод после очистки производился в лабораторных условиях Рижского нефтемаслозавода на нефелометре ФЭК-56М.

В результате исследований конструкций форсунок в лабораторных условиях был получен эффект очистки сточных вод от нефтепродуктов до 96 %. Для практического применения рекомендуется как наилучшая форсунка с двухслойным конусообразным фильтром.

Литература

1. Мацнев А.И. Очистка сточных вод флотацией. Киев, Будивельник, 1976, с. 7–17.

2. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М., 1949. 479 с.

3. Пухначев Ю.В. Введение в динамику пузыря, находящегося внутри жидкости. Вычислительный центр АН СССР, М., 1968, с. 152–221.

4. Кошкин И.Н., Ткачев А.Г. и др. Холодильные машины. – Пищевая промышленность, М., 1973. 540 с.

5. Надысев В.С., Щербакова Л.Н., Безгина И.В. Некоторые вопросы исследования работы флотационных сооружений. ВНИИжиров, М., 1978, с. 16–21.

Z. Yakubovskaya

Experimental Researches of Sewage Treatment Containing Oil by Method of Flotation with Application of Vortical Method of Air Blisters Formation

Summary

The article presents the method of air blisters formation with the help of vortexes formed in flotator. The experimental device for the application of vortical method of air blisters formation is described. The results of the researches of injector application for sewage treatment containing oil are given. The efficiency of vortical method and optimum parameters of the process are also investigated.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.3I

Х.А. Мёльдер

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДООТВЕДЕНИЯ В МАЛОЙ КАНАЛИЗАЦИИ

I. Введение

При проектировании систем бытовой канализации и очистных сооружений основные расчетные параметры (расход, загрязнения) определяются по нормам водоотведения (л/чел·сут), коэффициентам неравномерности ($K_{сут}$, $K_{час}$, $K_{общ}$) и удельным загрязнениям (г $БПК_5$/чел·сут), приводимым в СНиП [I; 2]. Хотя малая канализация имеет ряд существенных отличий от городских канализационных систем [3], действующие нормы это почти не учитывают, что нередко приводит к ошибкам при проектировании. В некоторых работах приведены сведения об этом [4], но явно необходимы более глубокие исследования для уточнения расчетных показателей водоотведения в малой канализации. Результаты соответствующих работ, проведенные в современных благоустроенных сельских поселках Эстонской ССР, приводятся ниже.

2. Методика исследования

Натурные измерения проводились сотрудниками Таллинского политехнического института и гидрохимической лаборатории ГПИ "Эстмелиопроект" на I0 раздельных системах малой канализации со среднесуточным расходом I,6...I30 $м^3$ (табл. I). Расходы сточных вод измерялись в разные времена года в течение 2...I0 суток при помощи лимниграфа "Валдай", устанавливаемого в канализационном колодце перед треугольным водосливом (самотечные системы) либо в приемном резервуаре насосной (напорные системы). Одновременно отбирались пропорциональные пробы для определения усредненного $БПК_5$ за сутки.

Таблица I

Характеристика систем канализации

Место расположения	Степень благоустройства и общественные здания	$Q_{ср}$ $м^3$/сут	Расчетное кол-во людей $N_{экв}$	Норма водоотведения л/чел·сут	$K_{час}$	$K_{общ}$	Удельные загрязнения г $БПК_5$ / чел·сут
Центр. усадьба совх. Ранна	жилздания (цг)	I,6	I6	I02	2,5	3,2	30
пос. Карла	жилздания (мк)	8,7	36	243	I,9	2,5	45
пос. Кийли	жилздания (мк), баня, столовая	I4,5	70	207	I,6	I,8	32
центр. усадьба совх. Кахала	жилздания (мк), детсад	20,I	II4	I76	2,2	2,6	55
пос. Лагеди	жилздания (цг)	28,4	209	I36	2,5	3,0	I9
центр.усадьба совх. Хабая	жилздания (мк), детсад	4I,5	I85	224	I,6	2,I	86
центр. усадьба колх. Вамбола	жилздания (мк, цг), детсад, столовая, контора	47,4	I65	287	2,3	2,5	69
пос. Лаагри	жилздания (цг)	69,4	209	332	2,2	2,5	47
пос. совх.-техн. Куремаа	жилздания (цг), школа, интернат	96,5	520	I86	2,7	2,8	29
пос. Сымеру	жилздания (цг, мк), контора	I29,6	678	I9I	I,7	2,0	20

Примечание: цг – центр. горячее водоснабжение
мк – местн. дровяные (газовые) колонки

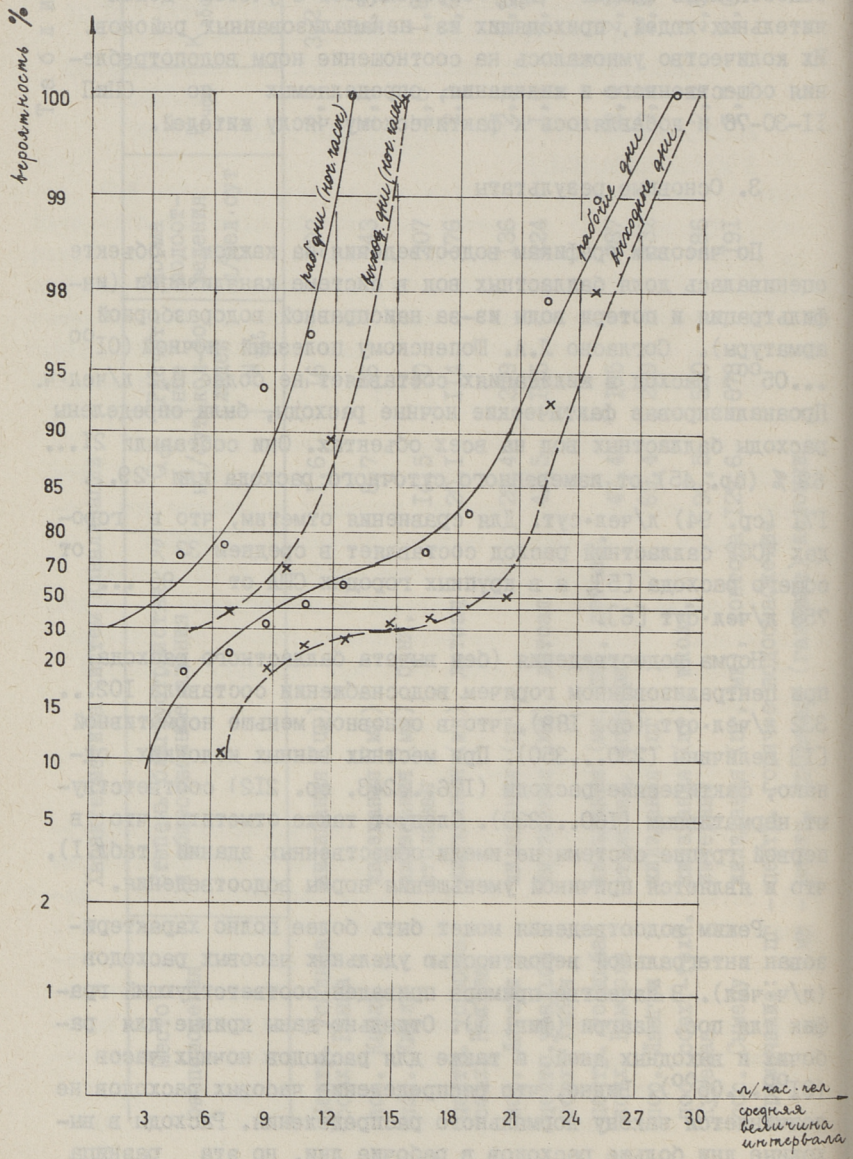
Расчетное количество людей, пользующихся системой канализации ($N_{экв}$) на объектах только с жилой застройкой равнялось фактическому числу жителей. При наличии также общественных зданий $N_{экв}$ определялось с учетом дополнительных людей, приходящих из неканализованных районов. Их количество умножалось на соотношение норм водопотребления общественного и жилздания, определяемых по СНиП II-30-76 и добавлялось к фактическому числу жителей.

3. Основные результаты

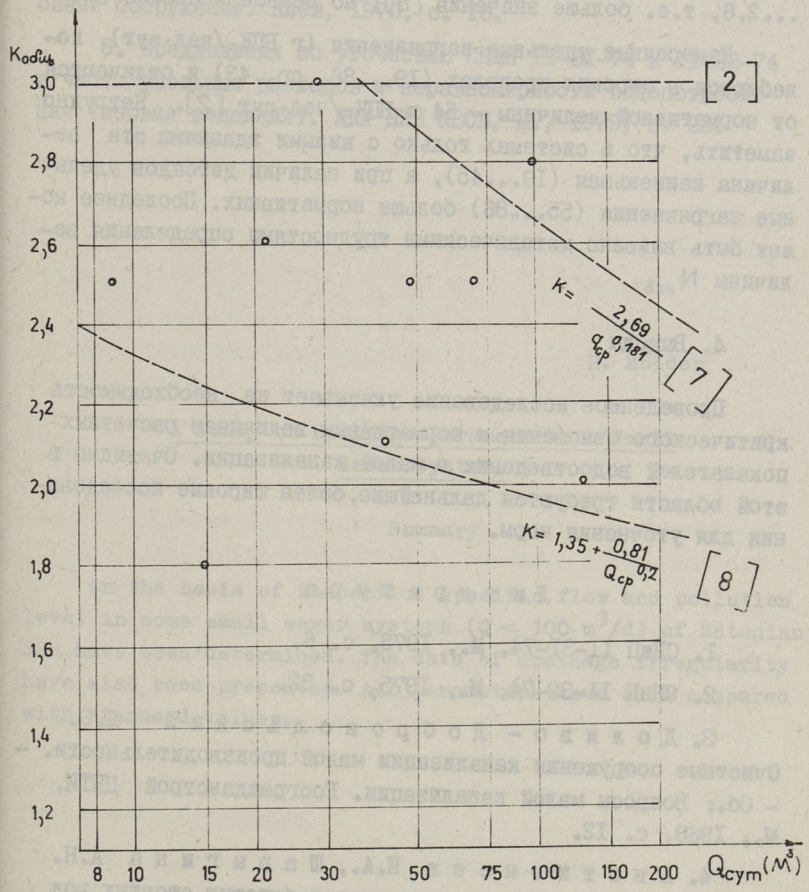
По часовым графикам водоотведения на каждом объекте оценивалась доля балластных вод в системе канализации (инфильтрация и потери воды из-за неисправной водоразборной арматуры). Согласно Л.А. Шопенскому полезный ночной (01^{00} ...05^{00}) расход в жилзданиях составляет не более 0,2 л/чел·ч. Проанализировав фактические ночные расходы, были определены расходы балластных вод на всех объектах. Они составили 21... 69 % (ср. 45) от измеренного суточного расхода или 29... 171 (ср. 94) л/чел·сут. Для сравнения отметим, что в городах ЧССР балластный расход составляет в среднем 33 % от общего расхода [5], а в крупных городах США от 95 ... 758 л/чел·сут [6].

Норма водоотведения (без вычета балластного расхода) при централизованном горячем водоснабжении составила 102... 332 л/чел·сут (ср. 189), что в основном меньше нормативной [1] величины (230...350). При местных ванных колонках, однако, фактические расходы (176...243, ср. 212) соответствуют нормативным (160...230). Следует также отметить, что в первой группе системы не имели общественных зданий (табл.1), что и является причиной уменьшения нормы водоотведения.

Режим водоотведения может быть более полно характеризован интегральной вероятностью удельных часовых расходов (л/ч·чел). В качестве примера приведен соответствующий график для пос. Лаагри (фиг. 1). Отдельно даны кривые для рабочих и выходных дней, а также для расходов ночных часов (01^{00}...05^{00}). Видно, что распределение часовых расходов не подчиняется закону нормального распределения. Расходы в выходные дни больше расходов в рабочие дни, но эта разница сокращается с увеличением степени обеспеченности часового



Фиг. 1. Интегральная вероятность удельных часовых расходов для пос. Лаагря.



Фиг. 2. Коэффициенты неравномерности водоотведения по опытным и литературным данным

$q_{ср}$ (л/с); $Q_{ср}$ ($м^3$/ч).

расхода. В табл. I и на фиг.2 даны коэффициенты неравномерности водоотведения $K_{общ} = K_{час} \cdot K_{сут}$. Коэффициенты суточной неравномерности изменяются незначительно ($K_{сут} = I,I$ ... I,3). На графике приведены также данные из различных литературных источников для определения $K_{общ}$ (кроме СНиП II-32-74 они не учитывают внутричасовые колебания водоотведения). Как видно из опытных данных, в среднем $K_{общ} = 2,5$ ...2,6, т.е. больше значения [8], но меньше значения [7].

Измеренные удельные загрязнения (г $БПК_5$/чел·сут) колеблются в широких пределах (I9...86, ср. 43) и отличаются от нормативной величины - 54 г $БПК_5$/чел·сут [2]. Нетрудно заметить, что в системах только с жилыми зданиями эта величина наименьшая (I9...45), а при наличии детсадов удельные загрязнения (55...86) больше нормативных. Последнее может быть вызвано методическими трудностями определения величины $N_{экв}$.

4. Выводы

Проведенное исследование указывает на необходимость критического отношения к нормативным величинам расчетных показателей водоотведения в малой канализации. Очевидно в этой области требуются дальнейшие, более широкие исследования для уточнения норм.

Литература

I. СНиП II-3I-74, М., I975, с. 6.

2. СНиП II-32-74, М., I975, с. 32.

3. Доливо-Добровольский Л.Б. Очистные сооружения канализации малой производительности. - Сб.: Вопросы малой канализации. Госгражданстрой ЦНТИ, М., I968, с. I2.

4. Евстигнеев И.А., Шарыгина А.Н. Исследование неравномерности притока бытовых сточных вод на малые очистные сооружения. - Сб.: Микроклимат и сан. техн., Л., I974, с. 57-60.

5. J i n d r i c h, J. et al. Podil balastnich vod v odpadnich vodach stokovych siti. - Vodni hospodarstvi, 1977, N 8-B, 193-201.

6. Sewage Treatment Plant Design. - FSIWA Manual of Practice, N 8. Washington, 1959, 25-27.

7. В а с и л е н к о А.И. Малые очистные канализационные сооружения. Киев, 1970, с. 16.

8. Предложения по уточнению СНиП II-31-74 и II-32-74 в части удельных расходов и неравномерности водопотребления (первая редакция). АКХ НИИ КВОВ, М., 1979, с. 23.

H. Mölder

A Study of Drainage Parameters in Small Sewer Systems

Summary

On the basis of inspection specific flow and pollution level in some small sewer systems ($Q < 100\ m^3/d$) of Estonian SSR have been determined. The data of drainage irregularity have also been presented. All parameters have been compared with standard values.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.3:639.3.07

В.А. Блонская

УДАЛЕНИЕ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

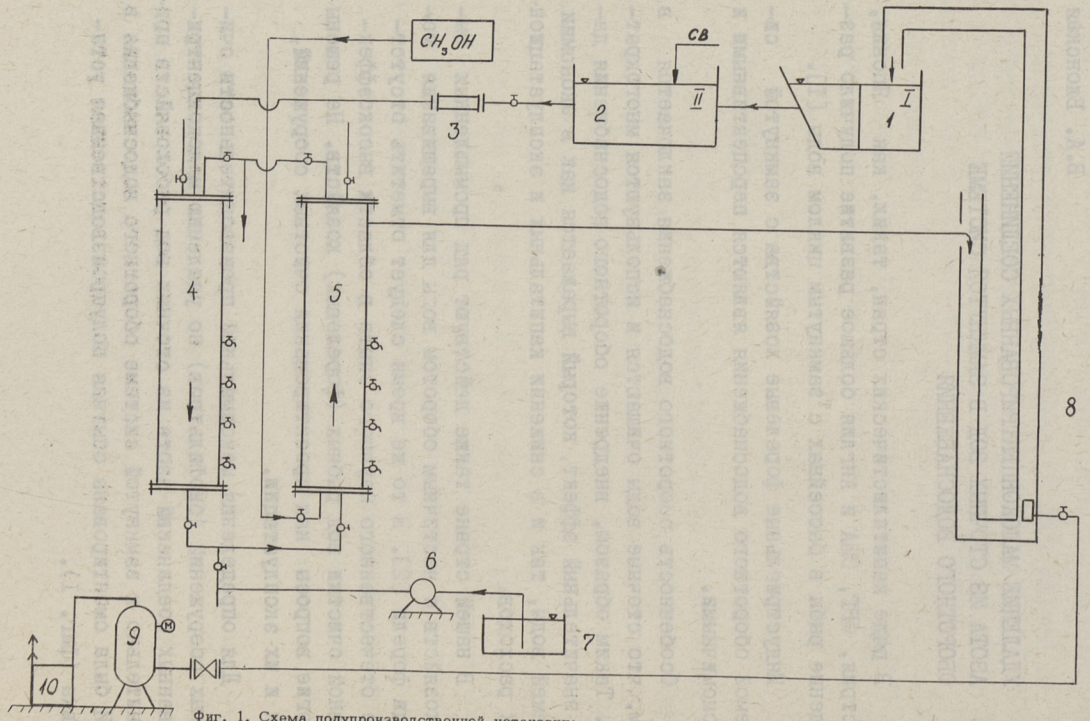
В ряде капиталистических стран, таких, как Япония, Австрия, ФРГ, США и Англия большое развитие получило разведение рыбы в бассейнах с замкнутым циклом воды [I].

Индустриальные форелевые хозяйства с замкнутой системой оборотного водоснабжения являются перспективными и экономичными.

Особенность оборотного водоснабжения заключается в том, что сточные воды очищаются и используются многократно. Таким образом, внедрение оборотного водоснабжения дает значительный эффект, который выражается как в экономии свежей воды, так и в снижении капитальных и эксплуатационных расходов.

В нашей стране также действуют ряд промышленных рыбохозяйств с частичным оборотом воды для выращивания молоди форели [2]. В то же время следует отметить отсутствие отечественного научного опыта в области высокоэффективной очистки вод рыбных (форелевых) хозяйств. Не решены многие вопросы как проектирования очистных сооружений, так и их эксплуатации.

Для определения максимальной производительности очистных сооружений (биофильтров) по удалению малоконцентрированных соединений азота из сточных вод рыбохозяйств применительно к замкнутой системе оборотного водоснабжения в ТПИ была смонтирована опытная полупроизводственная установка (фиг. I).



Фиг. 1. Схема полупроизводственной установки:
1 – полочной отстойник; 2 – промежуточный бак; 3 – расходомер, 4 – фильтр-нитрификатор; 5 – фильтр-денитрификатор; 6 – промывочный насос для промывки фильтров, 7 – резервуар чистой воды; 8 – воздушный подъемник, 9 – рессивер, 10 – компрессор, I, II – места отбора проб для химических анализов.

По нормативным данным допустимая концентрация нитратов для вод рыбохозяйств (форель) 10 мг/л и выше [3], а допустимая концентрация азота аммонийных солей - 0,5 мг/л, следовательно, основное внимание необходимо уделять удалению азота аммонийных солей, т.е. нитрификации.

Опыты проводились на искусственной сточной жидкости, что позволило исследовать влияние разных величин нагрузок на работу фильтров.

Сточная жидкость, состав которой был выбран на основе среды Stephenson [4, 5], подавалась в промежуточный бак, затем последовательно проходила биологическую очистку по схеме нитри-денитрификации (фильтры).

Для механической очистки стоков рыбохозяйств предусмотрен полочный отстойник. Искусственная сточная жидкость не содержала взвешенные вещества и поэтому отстойник использовался лишь для задержания биопленки, выносимой из фильтров.

Краткая характеристика очистных сооружений

Промежуточный бак. Объем - 110 литров.

Фильтры (нитрификатор и денитрификатор). Объем - 140 литров. Загрузка - кольца Рашига (25х25 мм, удельная поверхность 200 $м^2/м^3$),

Отстойник. Объем - 131 литр. Движение воды сверху вниз, уклон полок - 60^0, расстояние между полками - 5,5 см, длина полок - 90 см.

Для аэрации воды и создания ее циркуляции использовался воздушный подъемник из винипласта.

Все элементы стенда выполнены из нержавеющей стали и соединены трубопроводами из винипласта ø 40 мм.

Для обеспечения нормальной денитрификации во второй фильтр дозировался метанол, доза которого рассчитывалась по известному уравнению Mc. Carty [6].

Общий объем воды в системе был 600 литров. Качество воды в системе контролировалось регулярным отбором проб (2 раза в неделю) в двух точках (фиг. 1).

Все химические анализы выполнялись по стандартной методике. Ежедневно определялись температура воды, подача метанола и синтетической сточной жидкости, циркуляционный расход, а также уровень растворенного кислорода на входе в I фильтр.

Температура воды во время эксперимента колебалась от 9 до 22 °С. Количество растворенного кислорода на входе в фильтр-нитрификатор было равно насыщению. Средний циркуляционный расход воды был 2,9 $м^3$/сут, а средняя скорость фильтрации I,8 м/ч.

Реакция среды pH изменялась от 7,65 до 8,55.

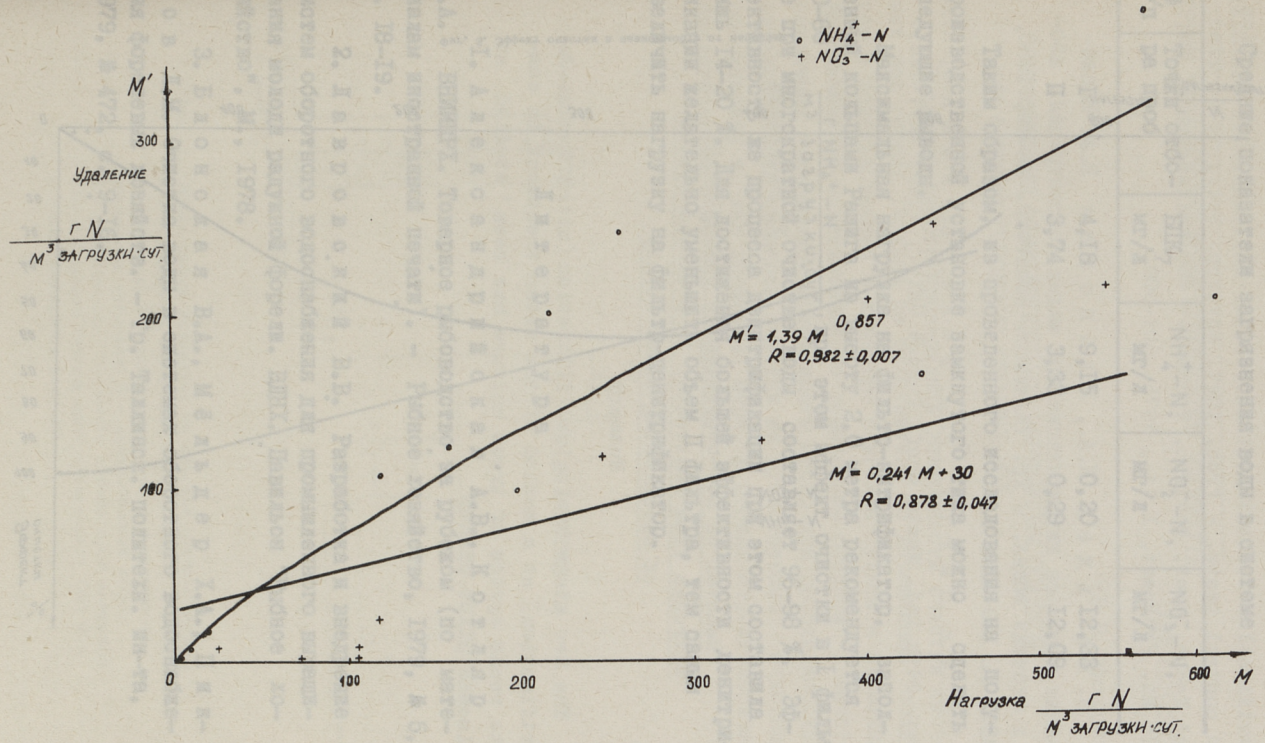
Для компенсации потерь воды (испарение, утечка через неплотности) в полупроизводственную установку за 203 дня было добавлено 245 литров свежей воды, что составило 4I % от объема воды в системе. В сутки же в систему добавлялось в среднем I,2 литра свежей воды, что составляет менее I % от общего объема воды в установке. При начальной нагрузке 4,0 $\frac{г\ NH_4^+-N}{м^3 \cdot загрузки \cdot сут}$ пусковой режим длился 3 месяца.

Промывка фильтров осуществлялась в среднем I раз в 3 недели в течение 4 минут с интенсивностью 8,4 $л/с \cdot м^2$. Для определения максимальной производительности фильтров нагрузка по азоту аммонийных солей (NH_4^+-N) на фильтр-нитрификатор повышалась от 4 до 6I5,00 $г/м^3$ загрузки·сут. Органическая нагрузка по $БПК_7$ изменялась от I0,26 до I64,02 $г/м^3$ загрузки·сут.

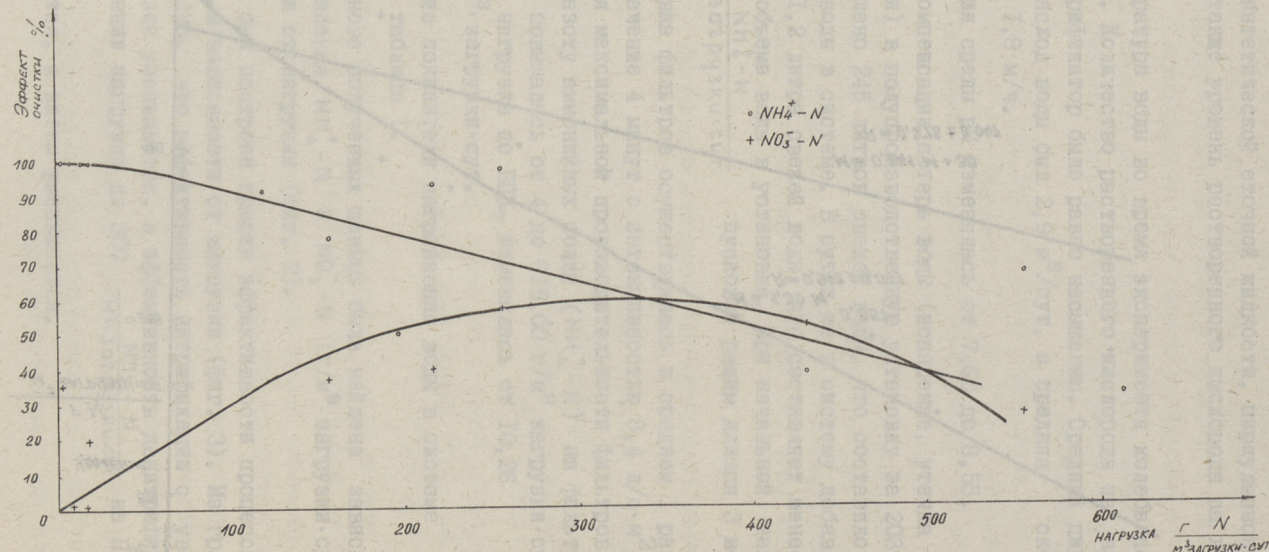
Средние показатели загрязнения воды в системе представлены в таблице I.

На основе полученных данных была найдена зависимость эффекта удаления NH_4^+-N и NO_3^--N ($г/м^3$ загрузки·сут) в зависимости от нагрузки (фиг. 2).

Также был построен график эффективности процесса нитрификации в зависимости от нагрузки (фиг. 3). Из графика (фиг. 3) видно, что эффективность нитрификации с увеличением нагрузки уменьшается, а эффективность денитрификации при увеличении нагрузки до 300 $\frac{г\ NO_3^- - N}{м^3 \cdot загрузки \cdot сут}$ на II фильтр увеличивается, а затем уменьшается.



Фиг. 2. Эффект удаления загрязнений ($NH_4^+ - N$ и $NO_3^- - N$) в 1 и 11 фильтрах в зависимости от нагрузки.



Фиг. 3. Эффект очистки в зависимости от нагрузки.

Таблица I

Средние показатели загрязнения воды в системе

№ п/п	Точки отбора проб	БПК$_7$ мг/л	NH_4^+-N, мг/л	NO_2^--N, мг/л	NO_3^--N, мг/л
I	I	4,I8	9,I5	0,20	I2,33
2	II	3,74	3,33	0,29	I2,09

Таким образом, из проведенного исследования на полупроизводственной установке замкнутого типа можно сделать следующие выводы.

Максимальная нагрузка на фильтр-нитрификатор, заполненный кольцами Рашига на высоту 2,0 метра рекомендуется 40-60 $\frac{г\ NH_4^+-N}{м^3\ загрузки \cdot сут}$, при этом эффект очистки в I фильтре при многократной очистке воды составляет 96-98 %. Эффективность же процесса денитрификации при этом составила лишь I4-20 %. Для достижения большей эффективности денитрификации желательно уменьшить объем II фильтра, тем самым увеличить нагрузку на фильтр-денитрификатор.

Литература

I. Александрийская А.В., Котляр О.А. ВНИИПРХ. Товарное рыбоводство за рубежом (по материалам иностранной печати). - Рыбное хозяйство, I979, № 5, с. I8-I9.

2. Лавровский В.В. Разработка и внедрение систем оборотного водоснабжения для промышленного выращивания молоди радужной форели. ВДНХ. Павильон "Рыбное хозяйство", М., I978.

3. Блонская В.А., Мёльдер Х.А., Пиков Л.М. Очистка воды в системах оборотного водоснабжения форелевых хозяйств. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, I979, № 472, с. 9-I6.

4. B e e r, C. et al. Kinetics and control tests of nitrification-denitrification process. Part II. Respiration and control tests. - Proc. Inst. Environ. Sci., 1976. 22nd Ann' Techn. Meet. Environ. Technol.' 76, Philadelphia, Pa, 1976 Mt. Prospect, I 11., 1976, 501-508.

5. М ё л ь д е р Х.А., Б л о н с к а я В.А. Исследование процесса нитрификации при малых концентрациях азота в сточных водах. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1980, № 485, с. 119-126.

6. M c C a r t y, P.L., B e c k, L., A m a n t, R.S. Proc. 24th Ind. Waste Conf. Purdue Univ., 1969, 1271-1285.

V. Blonskaya

Removal of Low-concentrated Compounds of Nitrogen from Wastewater in a Closed System of Circulating Water Supply

Summary

The two stage biological filtration (nitrification-denitrification) as a method of the water treatment in complete reuse system of trout culture has been studied at semiscale pilot plant.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

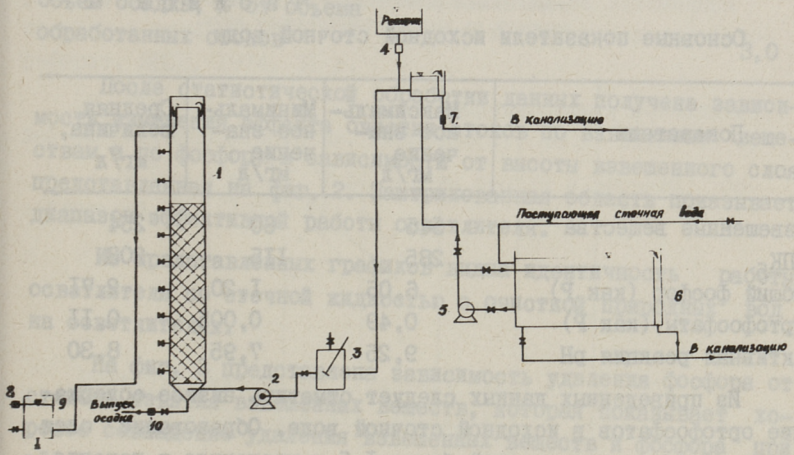
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.349

В.В. Макаров

ПРИМЕНЕНИЕ ОСВЕТЛИТЕЛЕЙ СО ВЗВЕШЕННЫМ ОСАДКОМ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

В данной работе проверялась возможность очистки сточных вод города Таллина на осветлителе со взвешенным осадком с использованием в качестве реагента сульфата алюминия. Использование осветлителей со взвешенным осадком вместо первичных отстойников может иметь место при необходимости интенсификации процесса очистки на существующих очистных сооружениях и, как временная мера, в период строительства биологических очистных сооружений.



Фиг. 1. Общая схема установки по очистке сточных вод: 1 – осветлитель со взвешенным осадком; 2 – насос-дозатор; 3 – камера смешения; 4 – дозатор объемного действия; 5 – центробежный насос; 6 – усреднитель; 7 – место отбора проб входящей СВ; 8 – место отбора проб осветленной СВ; 9 – бак для измерения расхода.

Исследование проводилось на установке, схема которой представлена на фиг. I.

В качестве осветлителя использовалась лабораторная колонка по конструкции, аналогично описанной в работе [I]. Высота колонки – 4,0 м, объем – 0,I4 м^3. Дозирование реагента [раствор $Al_2(SO_4)_3 \times 18H_2O$] было постоянным во времени. Для поддержания высоты взвешенного слоя в рабочих пределах осуществлялся выпуск осадка из нижней части осветлителя, так как результаты показали значительное увеличение концентрации взвешенных веществ в нижней части осветлителя (I5–I8 г/л) по сравнению с верхним слоем взвешенного осадка (3–5 г/л), хотя литературные данные не дают предпочтения какой-либо схеме выпуска осадка [2, 3, 4].

В настоящем исследовании не проводилось автоматического регулирования входящих и рабочих параметров осветлителя (pH, расход, высота взвешенного слоя, дозирование реагента). Характеристика городских стоков представлена в табл. I

Таблица I

Основные показатели исходной сточной воды

Показатель	Максимальное значение мг/л	Минимальное значение мг/л	Средняя величина, мг/л
Взвешенные вещества	545	60	254
$БПК_5$	285	II5	203
Общий фосфор (как P)	6,05	I,20	2,7I
Ортофосфаты (как P)	0,49	0,005	0,II
Активная реакция pH	9,25	7,95	8,30

Из приведенных данных следует отметить низкое содержание ортофосфатов в исходной сточной воде. Образование слоя взвешенного осадка высотой более I,5 м проходило в течение I2–I6 часов. При низких значениях доз реагента (<I50 мг/л) время образования слоя значительно увеличивалось.

По сравнению с неуправляемыми изменениями качества поступающей сточной воды рабочие параметры осветлителя поддерживались в заданных пределах, установленных после статистической обработки опытных данных.

Параметры работы осветлителя приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры работы осветлителя

Показатель	Максимальное значение	Минимальное значение	Средняя величина
Скорость восходящего потока, мм/с	0,65	0,38	0,565
Доза реагента, мг $Al_2(SO_4)_3 \times 18H_2O$ на I л сточной жидкости	250	I45	I70
Высота взвешенного слоя, см	285	I85	240
Активная реакция, pH	8,05	6,75	7,40
Поверхностная нагрузка, м/ч	2,4	I,4	2,0
Время пребывания стоков в осветлителе, ч - мин	2-57	I-4I	I-58
Объем осадка, % от объема обработанных стоков			3,0

После статистической обработки данных получена зависимость изменения эффекта очистки стоков по взвешенным веществам и по фосфору в зависимости от высоты взвешенного слоя, представленная на фиг. 2. Заштрихованная область показывает диапазон эффективной работы осветлителя.

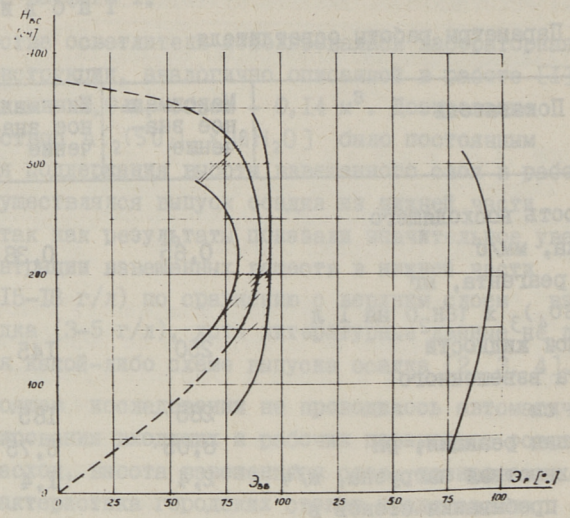
Из представленных графиков видна идентичность работы осветлителя со сточной жидкостью с очисткой природных вод на осветлителях.

На фиг. 3 представлена зависимость удаления фосфора от степени изъятия взвешенных веществ, которая показывает хорошее совпадение удаления взвешенных веществ и фосфора при эффектах очистки более 80 %, что дает возможность контролировать процесс очистки стоков только по изменению концентрации взвешенных веществ.

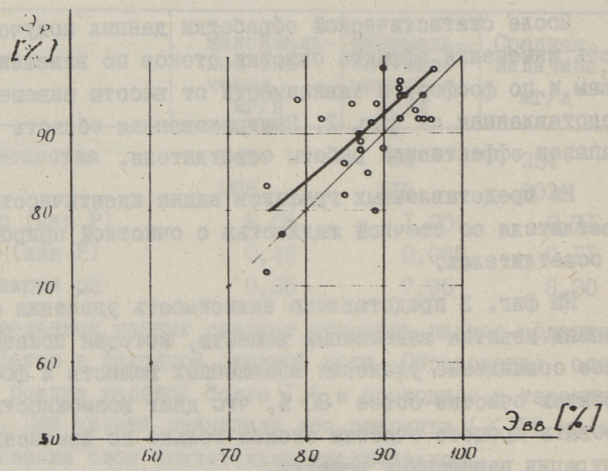
Устойчивая работа осветлителя со взвешенным осадком характеризуется следующими показателями эффекта очистки

по взвешенным веществам 80-95 %,

по общему фосфору 80–95 %,
по $БПК_5$ 50–70 %.



Фиг. 2. Изменение эффекта очистки сточных вод по взвешенным веществам и по фосфору в зависимости от высоты взвешенного слоя.



Фиг. 3. Зависимость эффекта удаления фосфора от степени изъятия взвешенных веществ в осветлителе со взвешенным осадком.

Концентрация ортофосфатов на выходе из осветлителя была менее 0,005 мг/л. Опыты подтвердили успешное протекание процесса очистки стоков при значениях pH выше 7,0, попытка регулирования значений pH в сторону уменьшения привела к всплытию осадка.

По сравнению с другими методами очистки реагентная обработка стоков в осветлителе со взвешенным слоем обладает более глубоким эффектом очистки по всем параметрам, кроме БПК, и дает возможность интенсификации процесса очистки сточных вод на первом этапе.

Литература

I. Orcutt, I.C., Carpenter, B.H. Click, C.N. Fluidized bed clarification in wastewater treatment. - Journal WPCF, 1973, sept., vol. 45, N 9, p. 1908-1927.

2. Абузейд И.М. Лабораторные исследования параллельной работы двух типов осветлителей со взвешенным осадком с пульсирующей подачей воды и без пульсации. Автореферат. ЛИСИ, 1974. 31 с.

3. Гочев Т.П. Принципы моделирования осветлителей со взвешенным осадком. Автореферат. МИСИ, 1973. 19 с.

4. Кургаев Е.Ф. Основы теории и расчета осветлителей. М., 1962. 164 с.

V. Makarov

Domestic Wastewater Treatment Using Fluidized Sludge Blanket Clarifier

Summary

The sludge blanket clarifier for removing contaminants from domestic wastewater was examined. Alum was used as coagulant. The ranges of the operating variables and some treatment effects are presented.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 551.465

М.А. Яшко

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ И ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В МЕЛКИХ МОРЯХ

I. Теоретические основы метода

Хорошая перемешиваемость воды в мелких морях позволяет предполагать жидкость однородной, а средние по глубине скорости движения достаточно полно отражают общую картину циркуляции. Поэтому для исследования динамической структуры потока в мелком море в зависимости от возмущающих внешних сил можно применить гидродинамические уравнения для баротропной жидкости в форме:

$$\left.\begin{aligned} -\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - e\bar{v} &= qH\frac{\partial \xi}{\partial x} + T^x \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + e\bar{u} &= qH\frac{\partial \xi}{\partial y} + T^y \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} &= \frac{d\bar{\xi}}{dt} \end{aligned}\right\} \qquad (I.I)$$

Совместно с системой (I.I) решаем полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии (I.2) для получения распределения примеси

$$-\mu\Delta S + \frac{\bar{u}}{H}\frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\bar{v}}{H}\frac{\partial S}{\partial y} = f. \qquad (I.2)$$

Здесь обозначено

$\bar{u}, \bar{v}$ – осредненные по глубине бассейна составляющие вектора скорости по горизонтальным осям x и y соответственно;

t – время;

e – параметр Кориолиса, рассчитываемый по формуле $e = 2w\sin\bar{\varphi}$;

где $\bar{\varphi}$ – широта места;

w – угловая скорость вращения Земли;

q – ускорение свободного падения;

H – глубина бассейна;

T^x, T^y – составляющие касательного напряжения ветра;

$\bar{\xi}$ – осредненное по площади бассейна превышение над невозмущенной поверхностью;

μ – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии;

Δ – лапласиан;

S – масса примеси в бассейне;

f – количество загрязнения, вводимое в бассейн.

За начальное условие принимается отсутствие течений. На твердых границах моря и на дне принимается условие прилипания, на жидких границах бассейна задаются расходы воды.

2. Разностная схема

Решаем систему (I.I) вводя понятие функции тока ψ и потенциала скорости φ следующим образом:

$$\bar{u} = -\frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \tag{2.I}$$

$$\bar{v} = \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y}. \tag{2.2}$$

Делая некоторые простые алгебраические преобразования, приходим к уравнениям для ψ и φ

$$\frac{\partial \Delta \psi}{\partial t} + e\frac{d\xi}{dt} - \frac{1}{H}\frac{\partial H}{\partial x}\frac{\partial^2 \psi}{\partial t \partial x} - \frac{1}{H}\frac{\partial H}{\partial y}\frac{\partial^2 \psi}{\partial t \partial y} + \\ + \frac{e}{H}\frac{\partial H}{\partial x}\frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{e}{H}\frac{\partial H}{\partial y}\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{H}\frac{\partial H}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t \partial y} + \right. \\ \left. + e\frac{\partial \varphi}{\partial x} - T^4\right) - \frac{1}{H}\frac{\partial H}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t \partial x} - e\frac{\partial \varphi}{\partial y} - T^x\right) + \\ + \frac{\partial T^y}{\partial x} - \frac{\partial T^x}{\partial y} \tag{2.3}$$

$$\Delta \varphi = \frac{d\xi}{dt}. \tag{2.4}$$

Правая часть уравнения (2.4) считается по формуле

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\Sigma G_i}{F}, \tag{2.5}$$

где F – площадь бассейна;

ΣG_i – суммарный расход воды на жидких границах.

Решаем (2.3), (2.4) разностным методом, выбирая для улучшения аппроксимации схемы сетку с расчетом различных переменных в разных узлах сетки. Для получения второго порядка аппроксимации по времени выбираем схему Кранк-Николсона.

Полученные разностные уравнения для (2.3),(2.4),(I.2) типа

$$A_{ij}\Phi_{i+1j} + B_{ij}\Phi_{ij} + C_{ij}\Phi_{i-1j} = D_{ij} \qquad (2.6)$$

с неизвестными Φ_{ij} решаем методом прогонки по индексу i от I до M для всех j от I до N , где M,N – число точек сетки по x, y соответственно.

Здесь A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij} – известные коэффициенты, зависящие от входных данных и вычисляемых в процессе решения величин. Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии считается по формуле:

$$\mu = \mu_0 + h^2\sqrt{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}, \qquad (2.7)$$

где h – шаг сетки, $\mu_0 = 10^6$ см^2/с.

3. Программа и пример расчета

Алгоритм задачи расчета течений и примеси в мелком море состоит в последовательном применении формул типа (2.6) для уравнений (2.3), (2.4) для последовательных значений $t = t_0$, $t = t_0 + \Delta t$ и т.д. до установления значений функции тока, затем в решении уравнения типа (2.6) для стационарного уравнения (I.2). Здесь t_0 – начальное время, Δt – шаг по времени.

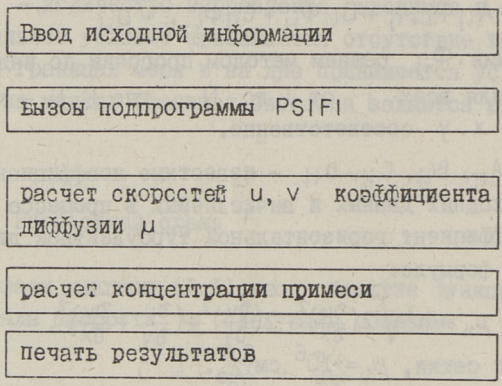
Программа дает возможность считать изменения скоростей течения и распределения примеси по реальному рельефу дна, заданному ветровому полю, расходам воды на жидких границах и нагрузке в мелком бассейне любой конфигурации.

Для реализации указанной разностной схемы была выбрана Бакинская бухта, в качестве нагрузки – нефтяные продукты.

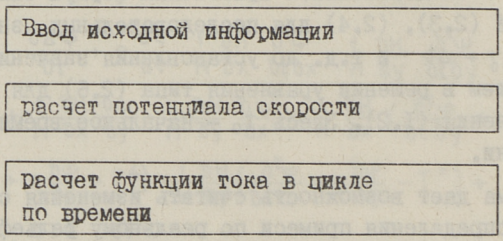
Шаг сетки был выбран 0,5 км. Шаг по времени равен 30 минутам. Нагрузка задавалась в пяти точках, суммарное количество которой равнялось I5 4I3 кг/сут. При постоянном северном ветре 5 м/с брались меняющиеся через каждые 6 часов рас-

ходы на жидких границах моря. Картины распределения течений и примеси в Бакинской бухте логично согласуются с направлением ветра, расходов на границах и расположением мест выпуска нефтепродуктов.

БЛОК-СХЕМА



БЛОК-СХЕМА ПОДПРОГРАММЫ PSIFI



M. Jashko

The Calculation Method of Flows and Pollutants in Shallow Seas

Summary

The article presents a mathematical model for the numerical calculation of unstationary wind flows and distribution of pollutants in shallow seas. The tangential wind stress on the flow on the liquid boundaries is known.

№ 505

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 502.55(204)+556.5+628.I.03:547.4I5

И.А. Велдре, С.А. Карлова, Л.А. Кульдмяэ

О СОДЕРЖАНИИ N-НИТРОЗАМИНОВ И ИХ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ В НЕКОТОРЫХ ВОДОЕМАХ ЭСТОНСКОЙ ССР

Среди водорастворимых канцерогенных веществ, способных вызывать образование опухолей у лабораторных животных и являющихся потенциально опасными для человека, в первую очередь, следует назвать нитрозамины (НА).

Нитрозамины являются промежуточными в синтезе красителей, различных гетероциклических соединений, аминокислот и т.д. Некоторые ароматические нитрозамины в виде комплексов с тяжелыми металлами применяются в качестве красителей. Они используются как растворители, добавки к смазочным средствам и бензину, противокоррозийным препаратам, используются как катализаторы полимеризации и средства, препятствующие ей [I]. Известно применение нитрозаминов при вулканизации резины, в текстильном и других производствах. Некоторые нитрозамины предложены для борьбы с сельскохозяйственными вредителями. Все это свидетельствует о широком распространении нитрозаминов, а также о реальности их поступления в производственные сточные воды, а затем в поверхностные водоемы и подземные воды. Этот процесс усугубляется хорошей растворимостью нитрозаминов в воде [I].

При обсуждении проблемы загрязнения внешней среды этими веществами следует иметь в виду также возможность их синтеза при действии нитритов и кислот на вторичные и третичные амины и гетероциклические соединения. Такая возможность может быть реальной как во внешней среде (например, при смешивании промышленных стоков, имеющих в своем составе необходимые ингредиенты), так и в организме человека и животных.

В Эстонской ССР широко используются азотные удобрения, а во многие мясные и рыбные продукты добавляется селитра. Поэтому вода и соответствующие пищевые продукты, содержащие значительное количество нитритов и нитратов, поступают в желудочно-кишечный тракт человека. Обработка растений гербицидами также способствует накоплению в них нитритов.

Так как определение нитрозаминов в воде до последнего времени было затруднительно ввиду отсутствия достаточно чувствительных методов индикации, а вода может быть источником поступления в организм нитритов и нитратов, целесообразно было изучать загрязнение водоемов предшественниками НА - нитритами, нитратами, а также аммиаком, которые в результате бактериальных процессов могут превращаться одно в другое.

В настоящее время используются различные методы количественного определения летучих с водяным паром канцерогенных N-нитрозаминов (НА) в биологических субстратах. Выработан ряд газохроматографических методов [2, 3, 4]. Большинство этих методов основывается на селективном определении продуктов разложения нитрозогруппы. При анализе индивидуальных НА, в данном случае диметилнитрозамина (ДМНА), исследуемая проба разделяется хроматографически и определяются селективными детекторами.

Анализ с использованием термоионного и микрокулонометрического детекторов требует тщательной очистки проб от примесей. Кроме того, из-за малой чувствительности (10^{-9} г), для количественного анализа пробу следует концентрировать примерно в 1000 раз. По сравнению с вышеперечисленными методами метод, при котором используется анализатор термической энергии, имеет ряд существенных преимуществ. Анализатор обладает высокой селективностью и исключительной чувствительностью (10^{-12} г), а кроме того, при этом методе исходная проба не требует тщательной очистки и большого концентрирования.

Материал и методы

Институтом экспериментальной и клинической медицины МЗ ЭССР в течение ряда лет изучалось содержание нитритов,

нитратов и аммиака в разных водоемах республики - в реках Северной Эстонии, озерах окрестности города Таллина, Вооремааского ландшафтного заказника и в озере Выртсъярв, а также в ряде заливов Балтийского моря.

Предшественники НА и аммиак определялись по общепринятым методикам [5]. Для определения аммиака использовался метод колориметрического определения с реактивом Несслера. Нижний предел определения равен 0,05 мг в I л воды. Без разбавления можно определить не более 4 мг NH_4^+ в I л воды. Содержание нитритов определялось колориметрическим методом с сульфаниловой кислотой и α-нафтиламином. Этот метод позволяет определить без разбавления от 0,001 до 0,6 мг NO_2^- в I л воды. Для нитратов применялось колориметрическое определение с салицилатом натрия. Данным методом можно определить от 0,I до 20 мг NO_3^- в I л воды, не разбавляя пробы.

Методика подготовки проб для определения ДМНА в водных растворах описана в [6].

Очистка воды и введение проб в органический растворитель производилась в стеклянной колонке с адсорбентом "Extrelut" (Италия). Пробы концентрировались до определенного объема в термостате UL-I (Польша) при температуре 50 °С. Конечное концентрирование до ампулирования проводилось в токе чистого азота при комнатной температуре.

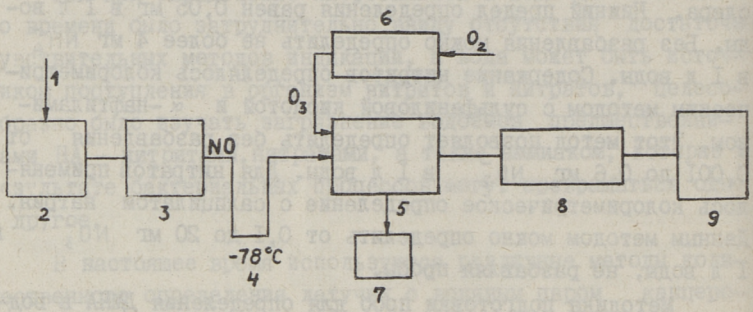
Для сравнения некоторые пробы для анализа были приготовлены методом двухступенчатой перегонки с водяным паром и дальнейшим концентрированием пробы как и в предыдущей очистке.

Для количественного определения ДМНА был применен анализатор термической энергии фирмы "Thermo Electron Corporation", предоставленный Национальным институтом рака США по договору NOI CP 65 797, TEA-502 в сочетании с газовым хроматографом PYE-I04 (Англия). Ниже приведены найденные оптимальные условия газохроматографического определения ДМНА в воде:

- стеклянная колонка I,5 м, внутренний диаметр колонки 4 мм,
- носитель - Chromatron N AW HMDS, 0,I0-0,I6 мм,
- температура колонки - I30 °С, изотермический,
- температура испарителя - 220 °С,

- газ-носитель Ar -20 мл/мин.,
- температура реактора ТЕА-502 - 490 °С,
- температура охладителя детектора - (-78 °С),
- расход кислорода - 17 мл/мин.,
- диапазон чувствительности детектора - 8,

Схема действия анализатора представлена на фиг. 1.



Фиг. 1. Блок-схема анализатора термической энергии:
1 - ввод пробы; 2 - хроматограф РУЕ-104;
3 - пиролизатор; 4 - холодильная ловушка (-78 °С);
5 - реакционная камера; 6 - озонатор; 7 - вакуумный насос; 8 - фотоумножитель; 9 - интегратор И-02.

Пробу НА вводили через хроматограф в пиролизатор, где происходит селективное каталитическое разложение НА.

$$RN - NO \rightarrow RN + NO$$

Окись азота в потоке газа-носителя (аргон) проходит через холодильную ловушку (-78 °С) в реакционную камеру. Другие продукты разложения НА и продукты разложения растворителя вымерзают в охлаждающей ловушке. В реакционной камере (давление несколько мм рт.ст.), в которую в потоке кислорода вводят озон, происходят следующие реакции:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 , \qquad (2а)$$

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 , \qquad (2б)$$

$$NO_2^* \rightarrow NO_2 + h\nu (0{,}6 - 3{,}0\ мк), \qquad (3а)$$

$$NO_2^* + M \longrightarrow NO_2 + M \qquad (3б)$$

* - возбужденные молекулы.

В результате спонтанной реакции (3а) возникает хемилюминесценция, интенсивность которой измерялась фотоумножителем в диапазоне 0,6-0,8 мк. Интенсивность ее прямо пропорциональна содержанию окиси азота, а следовательно, и содержанию НА. Чувствительность анализатора составляла 0,5 мкг/кг.

Результаты и обсуждения

Многолетние исследования показали, что средние концентрации предшественников НА и аммиака в воде изученных водоемов, как правило, находятся намного ниже установленных для этих веществ предельно допустимых концентраций (ПДК): для нитратов - 10 мг/л по азоту, для нитритов - 1 мг/л по азоту, для аммиака - 2 мг/л по азоту.

Таблица 1

Уровень N-содержащих соединений в воде некоторых водоемов

Водоем	Кол-во проб	Аммиак (N мг/л) M ± m	Нитриты (N мг/л) M ± m	Нитраты (N мг/л) M ± m
р. Вяэна	24	0,64±0,02	0,02±0,001	0,9±0,05
р. Кейла	26	0,58±0,07	0,008± ±0,0026	0,9±0,05
р. Пирита	24	0,65±0,02	0,013± ±0,001	0,8±0,06
р. Ягала	14	1,66±0,23	0,061± ±0,022	1,5±0,23
оз. Саадъярв	16	0,23±0,04	0,004± ±0,0012	0,4±0,03
оз. Кайавере	16	1,36±0,39	0,007± ±0,0009	0,3±0,06
оз. Пиккъярв	16	0,99±0,22	0,005± ±0,001	0,2±0,07
оз. Куремаа	16	0,45±0,10	0,003± ±0,0006	0,3±0,09

I	2	3	3	5
оз. Маарду	46	0,79±0,0I	0,0I3±0,00I	0,5±0,02
оз. Харку	48	0,98±0,03	0,0I3±0,00I	0,5±0,07
оз. Юлемисте	I4	0,3I±0,09	0,006±0,002	0,9±0,20

В таблице I приведены данные средних величин уровня азотсодержащих соединений в некоторых реках и озерах. Оценивая эти данные, следует отметить, что среднее содержание нитритов, нитратов и аммиака находятся в пределах санитарных норм. Лишь в единичных случаях в воде озера Харку уровень аммиака превышает этот предел.

Сезонная динамика содержания нитритов, нитратов и аммиака приведена в таблице 2. Как правило, наивысшие концентрации аммиака обнаруживаются зимой. Это, по-видимому, объясняется, с одной стороны, тем, что зимой процессы самоочищения идут медленнее и, попавшие в водоем свежие загрязнения остаются длительное время без изменения. С другой - отсутствием выраженной жизнедеятельности водных растений в этот период года.

Для сравнения содержания предшественников НА и N-нитрозаминов из рек Кунда и Нарва были отобраны пробы, в которых параллельно определялись как те, так и другие вещества.

Для изучения содержания ДМНА подвергались анализу кроме проб из пунктов, приведенных в таблице 3, еще 9 проб. Эти пробы были отобраны из Таллинского залива в пунктах 24, 67, Т-53, 4А, Т-84, из Пярнуского залива в пунктах 9, 4, 3 и из водопроводной воды. Уровень содержания предшественников НА и аммиака в водопроводной воде значительно ниже по сравнению с их уровнем в воде озера Юлемисте, что объясняется очисткой воды на водоочистной станции.

Хроматограмма разделения смеси модельных N-нитрозаминов представлена на фиг. 2.

Хроматограмма разделения изучаемой пробы показана на фиг. 3.

Время удерживания растворителя 2,4 мин., диметилнитрозамина - 4,I мин. и дипропилнитрозамина - 6,5 мин.

В заключение можно сказать, что все пробы воды из ис-

Таблица 2

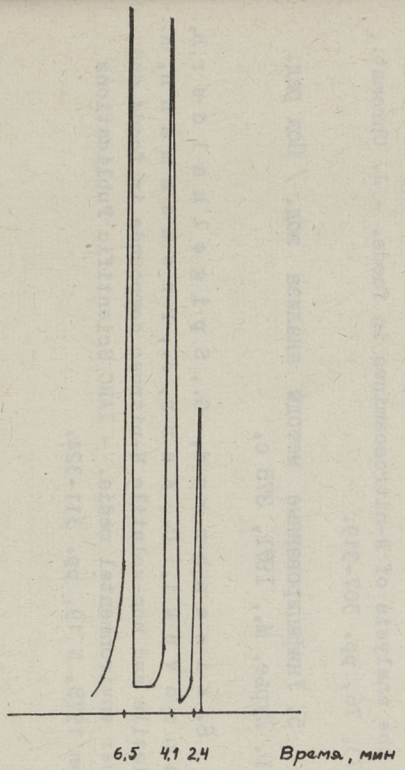
Сезонные колебания N-содержащих соединений в воде рек и некоторых водоемов

Водоем	Аммиак (N мг/л)				Нитриты (N мг/л)				Нитраты (N мг/л)			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
р. Вяэна	0,7I	0,82	2,08	0,64	0,049	0,0I3	0,0I5	0,0I4	0,8	I,I	0,6	I,0
р. Кейла	0,39	0,99	0,49	0,54	0,006	0,007	0,009	0,004	0,3	I,I	I,0	0,5
р. Пирита	0,56	0,30	0,74	0,83	0,0I0	0,025	0,009	0,0I8	I,6	0,9	0,6	0,6
оз. Саадъярв	0,II	0,3I	0,I4	0,4I	0,007	0,000	0,006	0,003	—	—	—	—
оз. Кайавере	3,96	0,66	0,I6	0,66	0,000	0,007	0,007	0,005	—	—	—	—
оз. Куремаа	I,08	0,I2	0,I9	0,42	0,000	0,003	0,004	0,006	—	—	—	—
оз. Пиккъярв	2,50	0,66	0,I9	0,89	0,004	0,000	0,007	0,008	—	—	—	—
оз. Харку	I,2I	0,55	0,64	0,96	0,008	0,004	0,003	0,002	0,3	0,2	0,I	0,I
оз. Маарду	0,68	0,42	0,69	0,4I	0,007	0,002	0,002	0,002	0,2	0,2	0,I	0,0

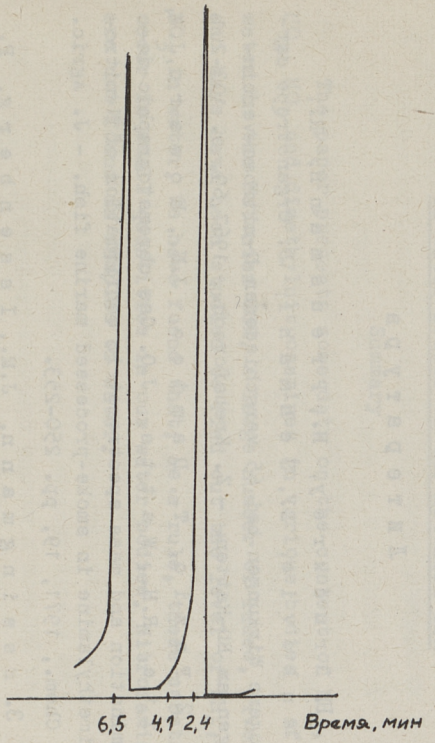
Таблица 3

Сравнительное содержание предшественников НА и N-нитрозаминов в воде некоторых водоемов

Место отбора пробы	Содержание аммиака, мг/л N	Содержание нитритов, мг/л N	Содержание нитратов, мг/л N	Содержание нитрозаминов, мкг/кг
р. Кунда у Лонтова моста	0,42	0,008	I,I	0
р. Кунда у моста мызы	0,4I	0,0I4	I,I	0
Отводящий канал Эстонской ГРЭС	0,39	0,008	0,5	0
Отводящий канал Прибалтийской ГРЭС	0,36	0,006	0,4	0
Золоотвал Прибалтийской ГРЭС	0,30	0,003	0,7	0
р. Нарва ниже спуска городских стоков	0,28	0,095	I,6	0
Пристань Кулгу	0,34	0,002	0,3	0
Начало пляжа Нарва-Йыэсуу	0,24	0,006	0,4	0
Середина пляжа Нарва-Йыэсуу	0,27	0,008	0,3	0
Конец пляжа Нарва-Йыэсуу	0,34	0,008	0,2	0
Устье реки Нарва	0,3I	0,005	0,4	0



Фиг. 2. Хроматограмма разделения смеси модельных N-нитрозаминов.



Фиг. 3. Хроматограмма разделения изучаемой пробы.

следованных водоемов не содержали ДМНА. Таким образом, вода из них в части НА и их предшественников не представляет опасности для здоровья.

Литература

1. Druckrey, H., Preusmann, R., Ivankovic, S., Schmahl, D. Organotrope carcinogene Wirkungen bei 65 verschiedenen N-nitroso-verbindungen an BD-Ratten. - Z. Krebsforsch., 1967,69, s. 103-201.

2. Fazio, T., Damico, J.N., Howard, J.W., White, R.H., Watts, J.O. Gas chromatographic determination and mass spectrometric confirmation of N-nitrosodimethylamine in smoke-processed marine fish. - J. Agric. Fd. Chem., 1971, 19, pp. 250-253.

3. Essingmann, J.M., Issenberg, P. Gas chromatographic determination of volatile nitrosamines in foods. - J. Fd. Sci., 1972, 37, pp. 684-688.

4. Palframan, J.F., MacNab, J., Grosby, N.T. An evaluation of the alkali flame ionisation detector and the Coulson electrolytic conductivity detector in the analysis of N-nitrosoamines in foods. - J. Chromat., 1973, 76, pp. 307-319.

5. Унифицированные методы анализа вод. / Под ред. Ю.Ю. Лурье. М., 1971, 375 с.

6. Eisenbrand, G., Spigelhalder, B., Janzovski, C., Kann, J., Preussmann, R. Volatile and non-volatile N-nitroso compounds in foods and other environmental media. - IARC Scientific Publications Lyon 1978, N 19, pp. 311-324.

I. Veldre, S. Karlova, L. Kuldmäe

On the Content of N-nitrosamines and Their Precursors in Water Bodies of the Estonian SSR

Summary

The paper presents some data on the content of NH_4, NO_2, NO_3 and dimethylnitrosamines in various bodies of water in the Estonian SSR. A large number of lakes, rivers and bays have been studied to find out the level of NH_4, NO_2, NO_3 in water. We have found that, as a rule, these substances occur in small quantities in our water bodies. Nitrosamines are not found in samples of water.

Содержание

I. Л.Я. Айнола, Т.А. Коппель, Ю.Ю. Ламп., У.Р. Лийв, О.О. Ээнсалу. О коэффициенте трения для ламинарного нестационарного течения жидкости в трубе. 3

2. Л.Я. Айнола, Т.А. Коппель, Ю.Ю. Ламп, У.Р. Лийв. О критериях перехода ламинарной формы течения в турбулентную при разгонном движении жидкости в круглой трубе. 17

3. Э.А. Руустал. Об использовании одномерной модели при исследовании неустановившегося течения жидкости в трубе. 31

4. Э.А. Руустал, Л. Сарв. Решение задачи о разгонном течении сжимаемой жидкости в трубе при помощи метода численного обращения преобразования Лапласа и метода конечных разностей. . . . 39

5. Я.Я. Кару, В.Р. Вийес. Моделирование технологических свойств воды водоисточника на ЭВМ. . . 49

6. Я.Я. Кару. К вопросу оптимизации загрузки скорых фильтров. 57

7. В.Р. Вийес, А.Г. Каск. Применение бактериофага для определения времени добегания воды в системе водообеспечения. 65

8. А.А. Ляэне, А.Э. Саава. Анализ нормативных показателей санитарно-микробиологической оценки качества морской воды в зонах рекреации. . . . 73

9. А.Л. Вызу, А.А. Ляэне. Статистические зависимости между некоторыми качественными параметрами морской среды. 85

IO. Якубовская З.И. Экспериментальные исследования очистки нефтесодержащих сточных вод методом флотации с применением вихревого способа образования пузырей воздуха. 93

II. Мёльдер Х.А. Исследование расчетных показателей водоотведения в малой канализации. . . . . IOI

I2. В.А. Блонская. Удаление малоконцентрированных соединений азота из сточных вод в замкнутой системе оборотного водоснабжения. I09

I3. В.В. Макаров. Применение осветлителей со взвешенным осадком для очистки городских сточных вод. II7

I4. М.А. Яшко. Методика расчета течение и переноса примеси в мелких морях. I23

I5. И.А. Велдре, С.А. Карлова, Л.А. Кульдмяэ. О содержании N-нитрозаминов и их предшественников в некоторых водоемах Эстонской ССР . . I29

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Труды ТПИ № 505

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Санитарная техника ХУ

Редактор У. Лийв. Технический редактор В. Ранник

Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 30. 12. 81.

Подписано к печати 15. 09. 81. Формат 60x90/16
Печ. л. 9,0 + 0,5 приложение. Уч..-изд. л. 7,8. Тираж 300
МВ-07979. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла, 2/9. Зак. № 538

Ц е н а руб. 1.20

© Таллинский политехнический институт, 1981

руб. 1.20