

р.б. /
485

ISSN 0136-3549
0203-9702

TALLINNA
POLÜTEHNILISE INSTITUUDI
TOIMETISED
485

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

ТРИ
'80

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ
ДВИЖЕНИЕ
ЖИДКОСТИ
В ТРУБАХ



485

**ТРИ
'80**

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

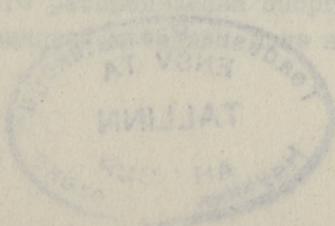
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.621.643

●
**НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ
ДВИЖЕНИЕ
ЖИДКОСТИ
В ТРУБАХ**

Сборник статей по санитарной технике XIV

Таллин 1980



Таллинский политехнический институт
Труды ТПИ № 485

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ
СБОРНИК СТАТЕЙ ПО САНИТАРНОЙ ТЕХНИКЕ XIУ

Редактор Л. Пааль. Технический редактор В. Ранник.
Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 27 февраля 1980 года.
Подписано к печати 23 октября 1980 года. Бумага 60x90/16.
Печ. л. 8,5 + 0,5 приложение. Уч.-изд. л. 7,39. Тираж 300.
МВ-09013. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла, 2/9. Зак. № 520.
Цена 1.10 руб.

© ТПИ, Таллин, 1980



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

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСКОРЕННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ

Введение

В стационарных турбулентных потоках для характеристики энергетических свойств течения успешно используется спектральное разложение пульсационной энергии, исходя из автокорреляционной функции по частотам [1, 2] или из пространственной корреляционной функции по волновым числам [3, 4]. Учитывая гипотезу Тейлора, можно в стационарных потоках произвести сравнение полученных результатов.

В работе [4] приводятся измеренные спектры локальных скоростей u при стационарном течении на разных расстояниях от стенки канала. Характерно, что расстояние от стенки влияет на распределение энергии скорости, относительная доля энергии низкочастотных компонентов от всей энергии в пристенной области больше, чем в ядре потока.

Спектры касательных напряжений на стенке τ_0 в условиях стационарного течения приводятся во многих работах [1, 2, 3, 5]. В результате анализа этих экспериментальных работ можно оценить, что в характеристике τ_0 при увеличении числа Re увеличивается относительная доля энергии высокочастотных компонентов пульсации.

На основе [6] выясняется, что распределения u и τ_0 отличаются от нормального распределения. В пристенной области течения коэффициент асимметрии $A > 0$, а в ядре потока $A < 0$, изменяется и эксцесс распределения по радиусу трубы.

Для расчета спектрального распределения энергии в нестационарных течениях общепринятой методики пока не суще-

стствует. Обзор теоретических работ в этой области приведен в [7], однако, как отмечает автор, явления гидродинамической нестационарности нельзя втиснуть в рамки детерминированной нестационарной модели и поэтому изложенные методы анализа не применимы.

В работе [5] предложен квазистационарный подход к анализу результатов измерений нестационарных характеристик.

При рассмотрении ускоренного движения жидкости из состояния покоя можно процесс течения разделить на три части: начальный ламинарный режим, переход на турбулентный режим и развитый нестационарный турбулентный режим. Вопросы деформации эпюр скоростей такого разгонного течения рассмотрены в работе [8]. Там же приводится описание экспериментальной установки, измерительной аппаратуры и методики проведения экспериментов, используемых в экспериментальной части данной работы.

Целью настоящей работы является оценка изменения энергии в турбулентной части ускоренного процесса при помощи спектрального анализа и статистического распределения пульсаций локальных скоростей u и касательного напряжения на стенке τ_0 .

Методика расчета

В работе [5] рассмотрены спектры касательных напряжений в стационарных и нестационарных течениях и приведены основы расчетной методики. Предложенная методика применяется и в данной работе для расчета энергосодержания локальной скорости u и касательного напряжения на стенке τ_0 .

В стационарном турбулентном течении, которое является эргодическим, можно получить оценки турбулентных характеристик через одну реализацию. В нестационарных течениях вопрос гораздо сложнее, здесь нужно провести серию опытов и оценить характеристики через обработку ансамбля. Для получения оценки спектрального состава нестационарного течения разделим реализацию u и τ_0 на короткие интервалы и проведем соответствующий расчет.

Экспериментальные данные u и τ_0 можно описать следующим образом:

$$x = \bar{x} + x_c, \quad (1)$$

где \bar{x} для короткого промежутка времени описывается следующим образом:

$$\bar{x} = \alpha t + \beta, \quad (2)$$

при том, α и β являются случайными величинами, x_c можно рассматривать как квазистационарную турбулентную реализацию. В дальнейшем мы рассматриваем u и τ_0 нестационарного течения как стационарные величины с линейным трендом, вызванным нестационарностью. Случайные коэффициенты α и β определяем из следующих условий

$$\int_0^T (x - \alpha t - \beta) dt = 0, \quad (3)$$

$$\int_0^T (x - \alpha t - \beta)^2 dt = \min. \quad (4)$$

После нахождения для каждой нестационарной реализации x_c вычисляем спектральные плотности и статистические распределения (гистограммы) и проведем обработку по методу ансамбля. На фиг. 1 приведено изменение τ_0 при начальном ускорении течения $dV/dt = 7,15$ м/г вместе с 90 %-ными доверительными пределами, полученными после обработки ансамбля из 52 опытов. Как видно, средний тренд для двух промежутков времени T_1 и T_2 , характеризующих нестационарность процесса, находится хорошо в 90 %-ных пределах. Вычитание тренда из реализаций необходимо также для получения правильного состава энергии высокочастотных компонентов пульсаций.

Статистические распределения вычисляем обычным методом, а спектральные плотности методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1] для дискретной случайной величины x_n

$$X_k(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot b_n \cdot \exp\left(\frac{-2\pi i k n}{N}\right), \quad (5)$$

где b_n сглаживающий фильтр косинусоидального типа для уменьшения просачивания энергии в следующем виде

$$b_n = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{10\pi n}{N}\right) \right], \quad 0 \leq n \leq \frac{N}{10};$$

$$b_n = 1, \quad \frac{N}{10} < n < \frac{9N}{10}; \quad (6)$$

$$b_n = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{10\pi(N-n)}{N} \right] \right\}, \quad \frac{9N}{10} \leq n \leq N.$$

Оценку спектральной плотности получаем следующим образом:

$$\bar{F}(f_k) = \frac{2h}{NH_b} |X_k|^2, \quad (7)$$

где h - интервал времени между отсчетами ($h = 0,001$) и $H_b = 0,875$ для вышеприведенного косинусоидального фильтра.

После этого проводим сглаживание спектра по частотам и обрабатываем по ансамблю. Во всех приведенных расчетах число отсчетов $N = 256$.

Характер дисперсии нормированных спектров описывается через параметр q , приведенный в работе [9]

$$q = \sqrt{1 - \frac{\lambda_i^2}{\lambda_0 \lambda_2}}. \quad (8)$$

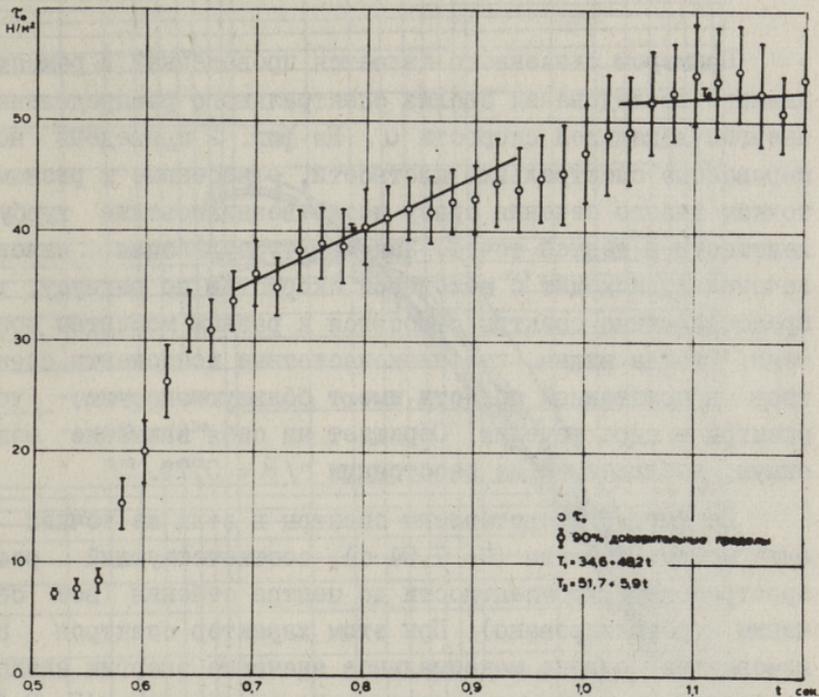
Моменты спектрального распределения найдем по формуле

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^m f_k^i \cdot \frac{F(f_k)}{\sigma^2} \Delta f, \quad (9)$$

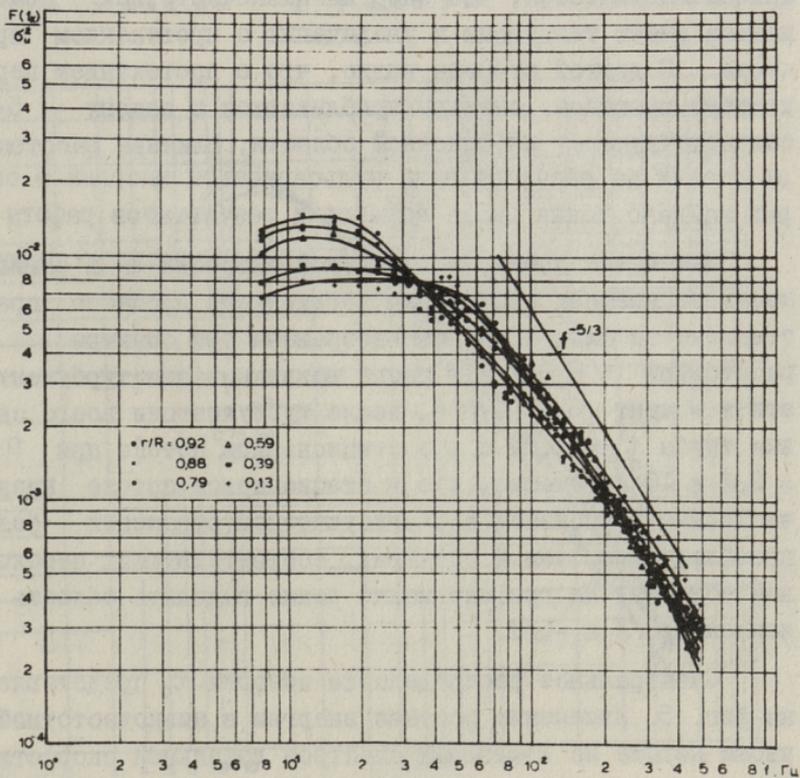
где спектральное распределение определено на равномерных частотах $f = f_k$, $k = 1, 2 \dots m$ и σ^2 дисперсия u и τ_0 . Фактор q является размером дисперсии частоты случайного процесса и должен находиться в пределах $0 \leq q \leq 1$. Для колебания в виде чистого синуса $q = 0$ и для узкополосного процесса q намного меньше единицы.

Спектральное распределение энергии

При разгоне жидкости из состояния покоя переход от ламинарного режима на турбулентный возникает в пристенных областях [8], после этого происходит распространение турбулентных зон в радиальном направлении к оси трубы. Как показывают опыты, характеристики турбулентности в разные моменты перехода по мере развития турбулентности, претерпевают большие изменения и постепенно с течением времени приближаются к величинам стационарных потоков.



Фиг. 1.



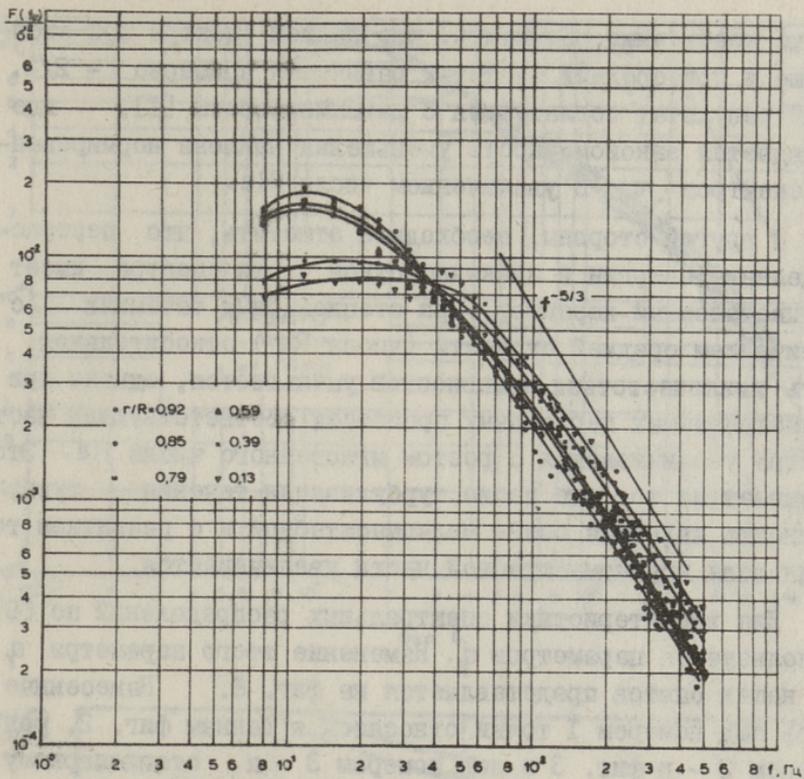
Фиг. 2.

Примером сказанного является проведенный в рамках данного исследования анализ спектрального распределения энергии локальной скорости u . На фиг. 2 приведены нормированные спектральные плотности, отнесенные к разным точкам живого сечения сразу после возникновения турбулентности в данной точке. Так как турбулизация живого сечения происходит с некоторой скоростью по радиусу, то представленные спектры относятся к разным моментам времени. Отсюда видно, что низкочастотные компоненты спектров в пристенной области имеют большую энергию, чем спектры в ядре течения. Обращает на себя внимание максимум, наблюдаемый на расстоянии $r/R = 0,79$.

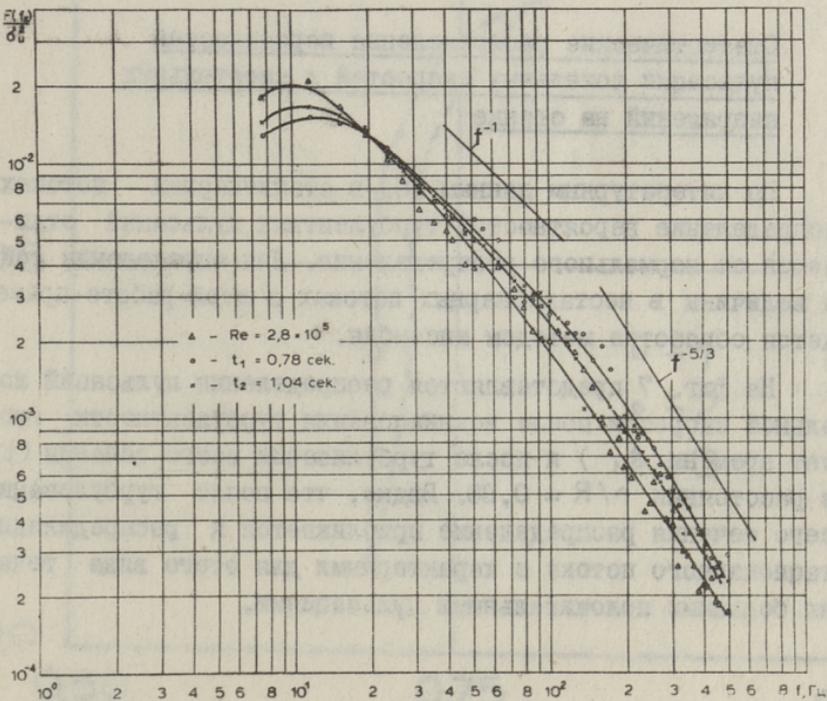
На фиг. 3 представлены спектры в этих же точках в один момент времени ($t = 1,04$ с), соответствующий распространению турбулентности до центра сечения (все сечение турбулизировано). При этом характер спектров не изменяется, однако максимальное значение энергии низкочастотных компонентов находится на расстоянии $r/R = 0,85$, причем наблюдается, что энергия низкочастотных компонентов имеет тенденцию к увеличению с протеканием процесса. С другой стороны видно, что с протеканием переходного процесса спектры приближаются к закону $-5/3$, соответствующему инерционной области. Влияние расстояния от стенки на распределение пульсационной энергии в спектрах найдено также после обработки результатов работы [4].

Изменение спектров локальной скорости u в зависимости от времени протекания переходного процесса представлено на фиг. 4. Здесь изображены три спектра на расстоянии $r/R = 0,79$: после возникновения турбулентности в момент $t_1 = 0,78$ с, после турбулизации всего сечения трубы $t_2 = 1,04$ с и в стационарном потоке при $Re = 2,8 \times 10^5$. Заметно, что в стационарном потоке низкочастотные компоненты в энергетическом отношении более преобладающие, чем в спектрах, соответствующих переходной области. На графике можно также выделить область с наклонами -1 и $-5/3$.

Спектральное распределение энергии τ_0 представлено на фиг. 5. Изменение состава энергии в низкочастотной части похоже на изменение спектров локальной скорости,



Фиг. 3.



Фиг. 4.

однако необходимо, отметить, что наклон спектра при этом меньше и при средних частотах равняется примерно $-2/3$. Такой результат согласуется с данными работы [1], где наблюдается закономерность уменьшения наклона нормированных спектров τ_0 с увеличением числа Re .

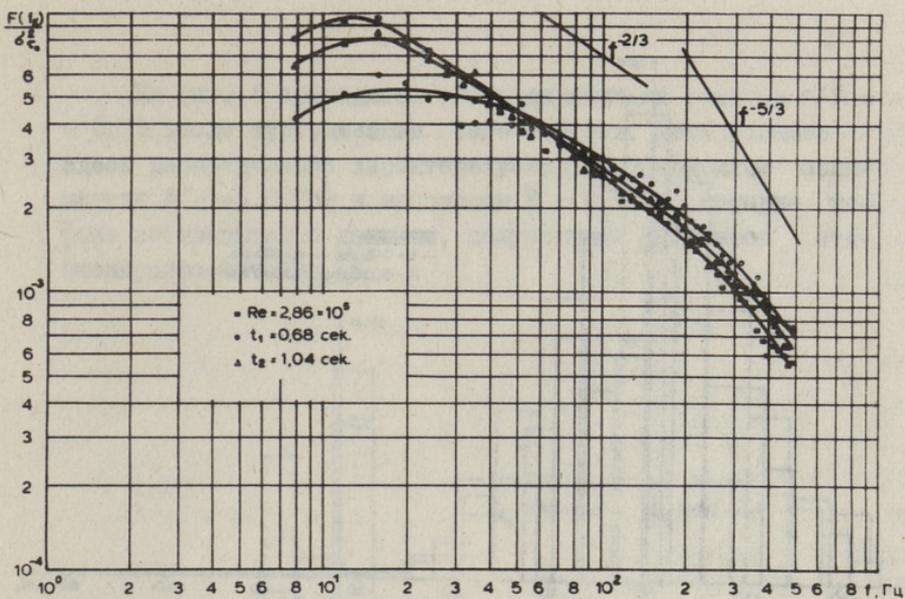
С другой стороны, необходимо отметить, что перераспределение энергии в низкочастотной части спектра имеет противоположный характер. При стационарных течениях с увеличением средней скорости (числа Re) относительная часть низкочастотных компонентов уменьшается, однако при рассматриваемых переходных процессах соответствующая часть спектра увеличивается с ростом мгновенного числа Re . Это указывает на то, что после турбулизации течения турбулентность является более мелкомасштабной и с развитием течения доля крупномасштабной части увеличивается,

Для характеристики спектральных распределений по [9] воспользуемся параметром q . Изменение этого параметра q для наших опытов представляется на фиг. 6. Нанесенные здесь под номером 1 точки относятся к данным фиг. 2, под номером 2 - к фиг. 3 и под номером 3 - к стационарному течению.

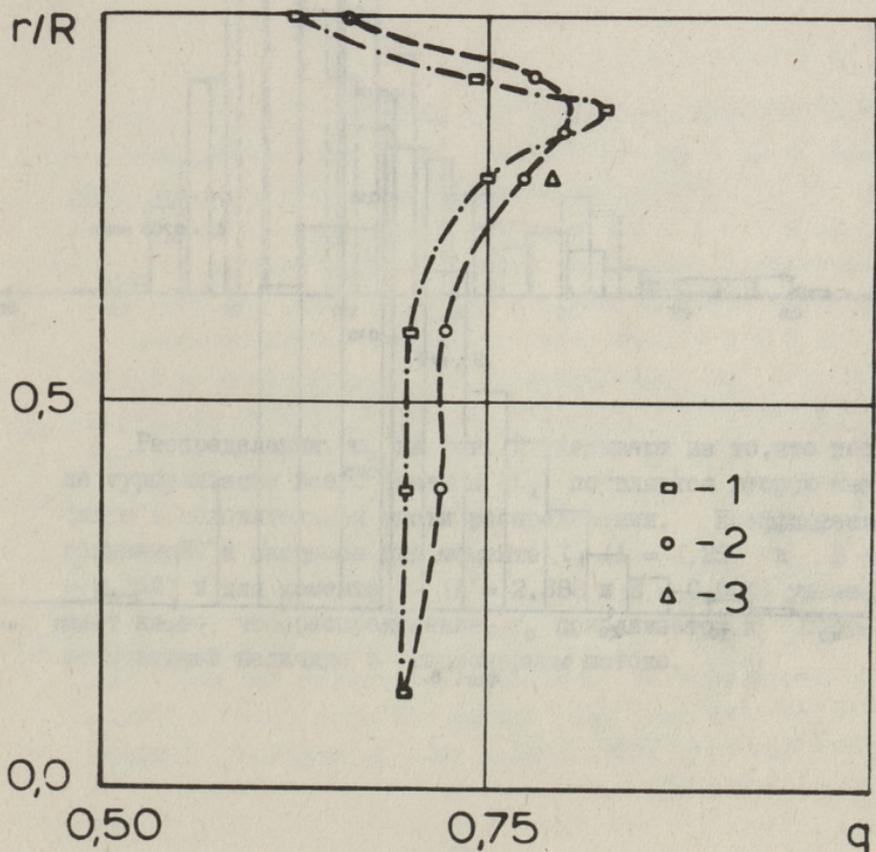
Статистические распределения вероятностей пульсации локальных скоростей и касательных напряжений на стенке

По литературным данным [6] в стационарных потоках распределение вероятностей турбулентных пульсаций отличается от нормального распределения. Для определения той же величины в нестационарных потоках в этой работе применяется обработка методом ансамбля.

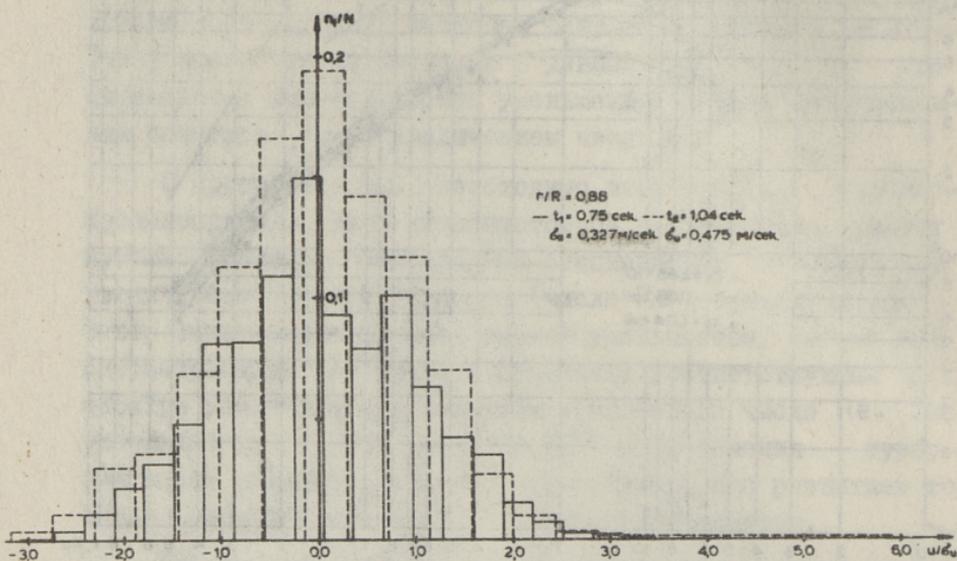
На фиг. 7 представляются распределения пульсаций локальной скорости после возникновения турбулентности (момент времени t_1) и после турбулизации всего сечения (t_2) на расстоянии $r/R = 0,88$. Видно, что после турбулизации всего сечения распределение приближается к распределению стационарного потока с характерными для этого вида течения большими положительными пульсациями.



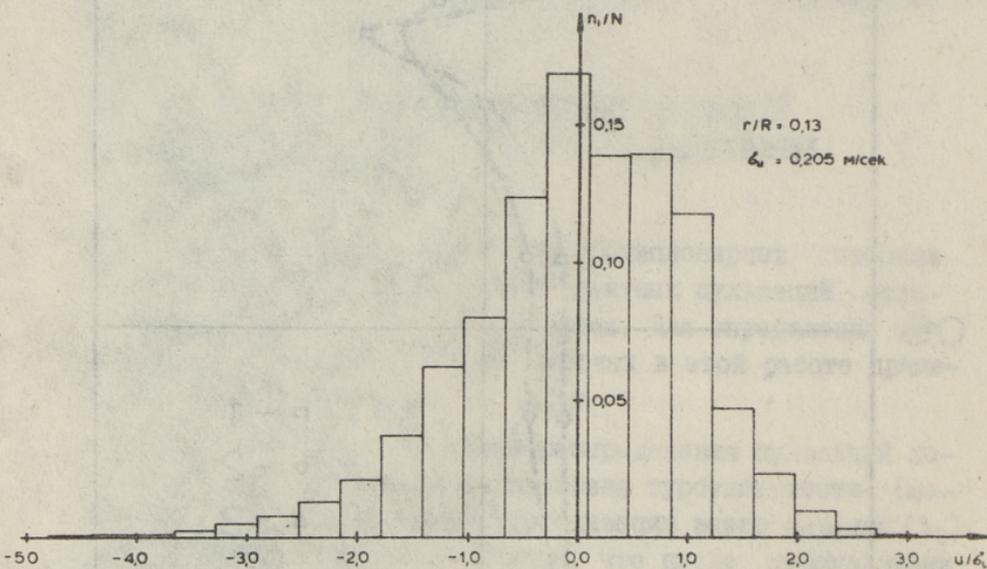
Фиг. 5.



Фиг. 6.

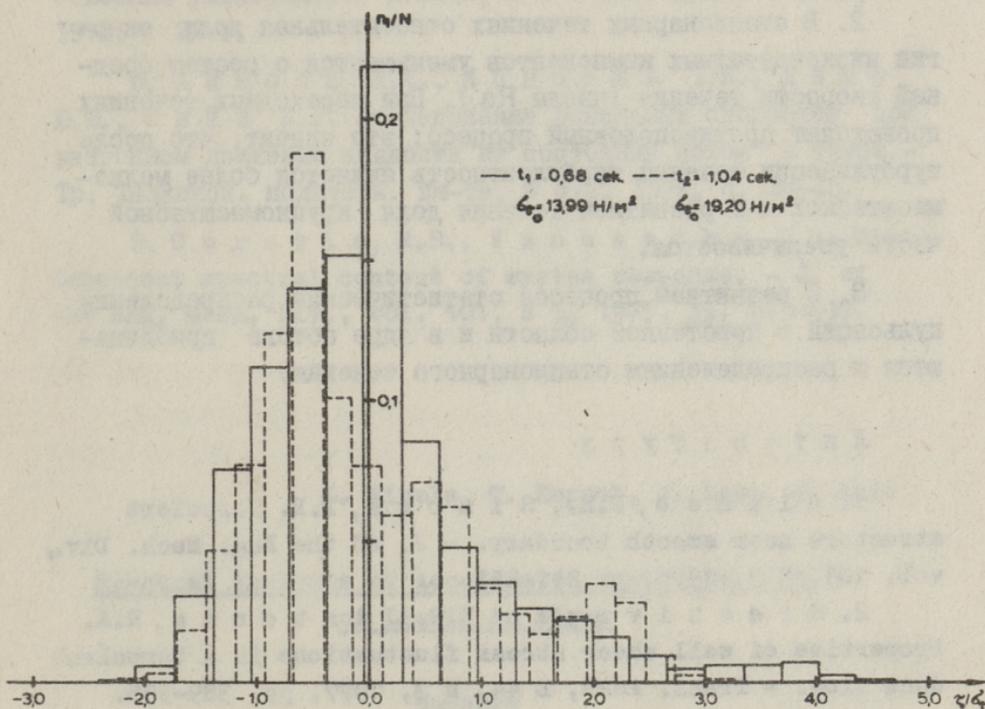


Фиг. 7.



Фиг. 8.

На фиг. 8 приводятся распределения на радиусе $r/R = 0,13$ после турбулизации всего сечения. Изображенное здесь распределение характеризуется коэффициентом асимметрии $A = -0,60759$ и эксцессом $E = 0,7118$, которые хорошо согласуются с данными, полученными из опытов стационарного течения [6].



Фиг. 9.

Распределения τ_0 на фиг. 9 указывают на то, что после турбулизации всего сечения (t_2) появляется второй максимум в положительной части распределения. Коэффициенты асимметрии и эксцесса для момента t_1 ($A = 1,297$ и $E = 0,844$) и для момента t_2 ($A = 2,388$ и $E = 0,024$) указывают на то, что распределение τ_0 приближается к соответствующей величине в стационарном потоке.

В ы в о д ы

1. При переходных к турбулентности течениях низкочастотные компоненты спектров локальной скорости в пристенной части течения имеют относительно большую часть из общей энергии, чем в ядре потока, притом имеется максимум на $r/R = 0,79$ в переходной части течения, и на $r/R = 0,85$ после турбулизации всего поперечного сечения трубы.

2. В стационарных течениях относительная доля энергии низкочастотных компонентов уменьшается с ростом средней скорости течения (числа Re). При переходных течениях происходит противоположный процесс: это значит, что после турбулизации течения турбулентность является более мелко-масштабной и с развитием течения доля крупномасштабной части увеличивается.

3. С развитием процесса статистические распределения пульсаций в пристенной области и в ядре потока приближаются к распределениям стационарного течения.

Л и т е р а т у р а

1. B l i n c o, P.H., S i m o n s, D.B. Turbulent structure near smooth boundary. - J. of the Eng. Mech. Div., vol. 101, N 3, 1975, p. 241-255.

2. S r e e n i v a s a n, K.R., A n t o n i a, R.A. Properties of wall shear stress fluctuations in a turbulent duct flow. - Trans. ASME, E 44, N 3, 1977, pp. 389-395.

3. M i e s R.W. The development of calibration techniques for a flushmounted hot-film anemometer in the study of turbulent boundary layers. A Trident Scholar Project Report, U.S. Naval Academy, Annapolis, Maryland, 1967, 54 pp.

4. К о н т - Б е л л о Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками. М., Мир, 1968.

5. A i n o l a, L.J., К о р р е л, Т.А., L i i v, U.R. An investigation of turbulence generation and wall shear stress spectral analysis during unsteady flow in tubes. - XVIII Congress IAHR, Proc., vol. 3, Gagliari, Italia, 1979, pp. 165-172.

6. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Сабелев Г.И., Таранов Г.С. Структура турбулентного потока и механизма теплообмена в каналах. Атомиздат, 1978.

7. Харенко А.М. Современный анализ нестационарных случайных процессов и возможность его применения к явлениям нестационарной турбулентности. Донецкий государственный университет. Донецк, № 0 775-75 ДЕП в ВИНТИ, 1974. 22 с.

8. 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, № 472, 1979, с. 35-45.

9. Sorotiss, R.V., Vanmarcke, E.H. Time-dependent spectral content of system response. - J. of the Eng. Mech. Div., vol. 101, N 5, 1975, pp. 623-637.

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

Spectral Analysis of Accelerated Turbulent Flow
of Liquid in Pipes

Summary

This paper deals with a qualitative estimation of the spectral content of the energy and statistical distribution of local velocity pulsations and skin friction in the pipe wall during unsteady flow. Normalised spectra density at different distances from the pipe wall are given. According to the spectral estimates the energy transfer between low and high frequencies in unsteady flow is opposite to the energy transfer in steady flow.

УДК 532.54.013.2

Э.Г. Каск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
СКОРОСТЕЙ ПО ЖИВОМУ СЕЧЕНИЮ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ
ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ *

Вопросы распределения скоростей по живому сечению при неустановившемся течении жидкости имеют существенное значение при определении потерь механической энергии, однако трудности, как теоретического, так и экспериментального характера, не позволяют до сих пор считать проблему решенной.

Теоретические решения поставленного вопроса из-за математических трудностей относятся только к ламинарному движению жидкости. При этом задачи решены при различных начальных и граничных условиях, при различных законах изменения давления во времени. Примеры таких решений приведены в работах [1, 2, 3].

Экспериментальному изучению вопроса посвящены лишь немногие работы, причем измерения относятся как к ламинарным [2], так и к турбулентным нестационарным потокам [4, 5].

В настоящей работе описываются экспериментальные исследования по изучению распределения скоростей при возникновении движения жидкости из состояния покоя.

Опытная установка, используемая при проведении опытов, имеет закрытый контур и выполнена из нержавеющей стали [7]. Экспериментальный участок с диаметром 61 мм имеет длину $L = 19,6$ м. Сечение, где проводились измерения по изучению распределения скоростей, находится на расстоянии 11,0 метра от плавного входа в экспериментальный трубопровод. Тем самым обеспечено отсутствие влияния входных условий в мерном сечении трубопровода.

* Экспериментальная часть работы выполнена в лаборатории гидравлики ТПИ в 1974/75 году.

Для изучения продольных локальных скоростей применяются термоанемометрические пленочные датчики типа 55A83 и 55A85 вместе с усилительной аппаратурой "ДИЗА" 55ДО1.

Для измерения расходов нестационарных потоков на контуре установлен специальный электромагнитный расходомер [8], предназначенный для измерения быстропротекающих гидравлических процессов.

Регистрация и обработка опытных данных производится на системе, разработанной в лаборатории гидротехники ТПИ [9].

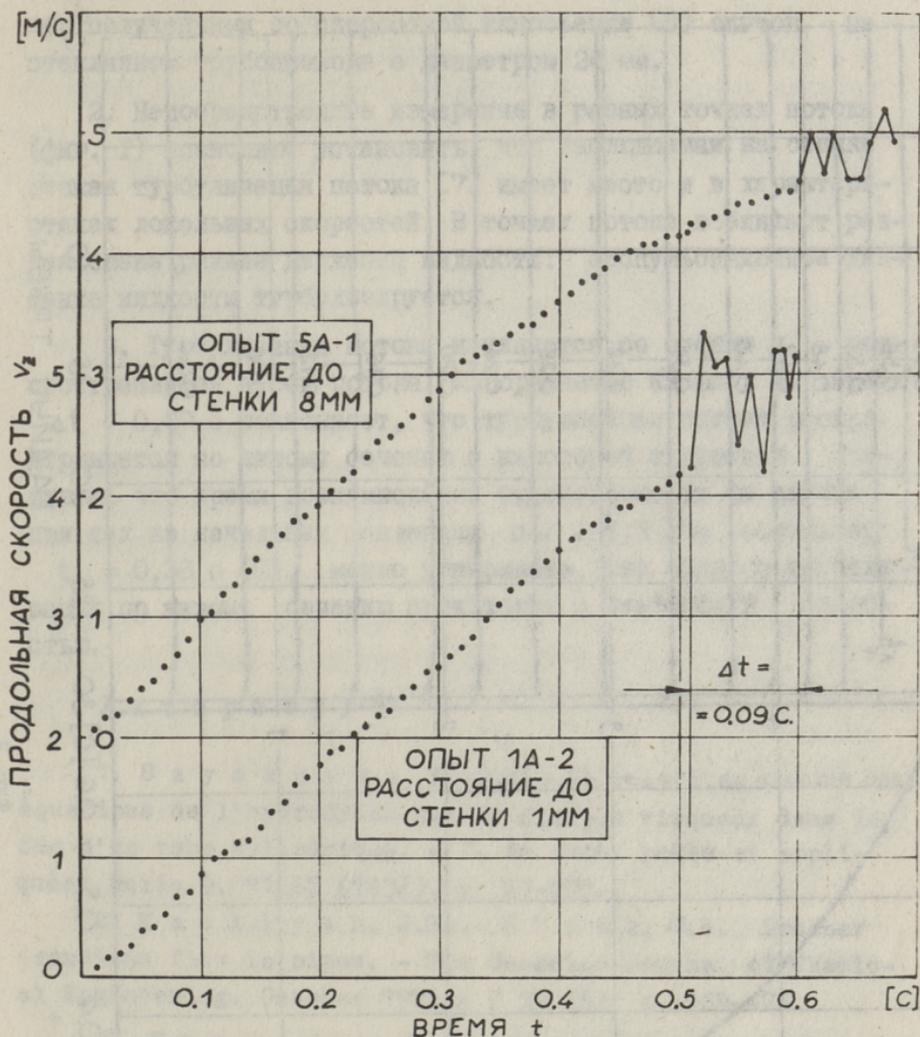
Нестационарные режимы создаются быстродействующим клапаном, расположенным в конце экспериментального участка. До начала открытия клапана в напорном баке насосом устанавливается необходимый для данного опыта напор. Специальный механизм, связанный с быстродействующим клапаном, обеспечивает хорошую воспроизводимость проводимых опытов.

Диапазон изменения средних скоростей на установке от 0 до 5 м/с. Этому соответствует изменение числа Рейнольдса до 300000.

Опыты по определению распределения скоростей проводились при многократном повторении заданного нестационарного режима. При этом эпюры распределения скоростей определялись путем перестановки датчика термоанемометра последовательно в разные точки по радиусу в мерном сечении трубопровода и многократным повторением данного нестационарного режима. Измерения локальных скоростей по радиусу состоялись в 10 точках.

Характерное изменение измерений в двух точках (на расстоянии 1 и 8 мм от стенки) во время разгонного нестационарного движения жидкости представляется на фиг. 1.

На следующей фиг. 2 изображаются обработанные на основе данных, представленных на фиг. 1, измерения в 10 точках по радиусу. На правой стороне фиг. 2 представляется последовательно развитие эпюр распределения продольных скоростей v_z во времени. Цифры на эпюрах показывают время от начала разгона жидкости. На левой стороне фиг. 2 приводятся данные измерений средней по сечению мгновенной скорости V . Как показывают расчеты, определенные по мгновенным эпюрам,



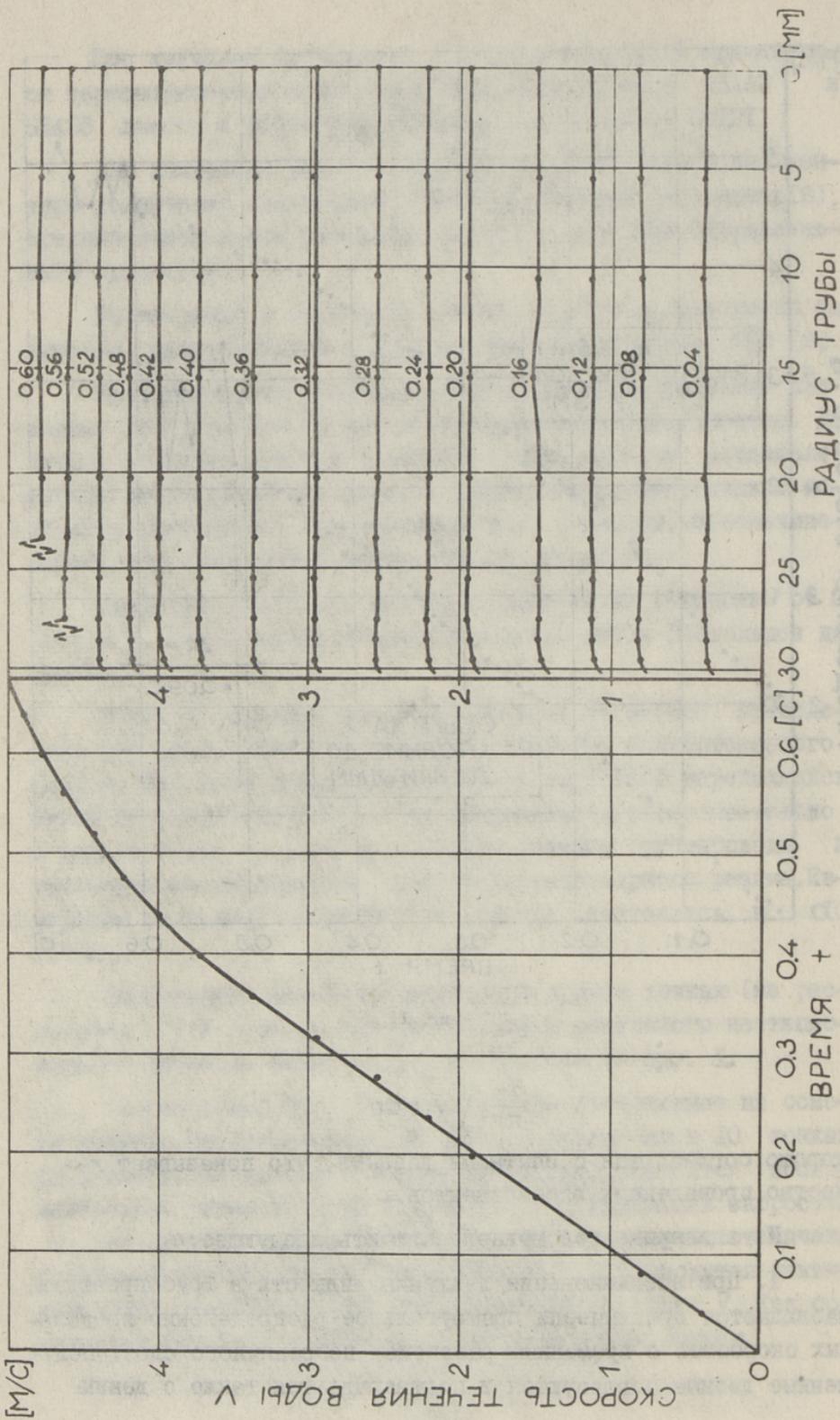
Фиг. 1.

$$V = \frac{2\pi}{\pi r^2} \int_0^r v_z r dr$$

хорошо согласуются с опытными данными, что показывает качество проведенных экспериментов.

Из экспериментов можно заключить следующее:

I. При возникновении движения жидкости в трубопроводах наблюдается практически прямоугольное распределение продольных скоростей с временным развитием пограничного слоя. Полученные данные согласуются и подтверждаются также с данными



Фиг. 2.

ми, полученными со скоростной киносъемки [5] опытов на стеклянном трубопроводе с диаметром 24 мм.

2. Непосредственные измерения в разных точках потока (фиг. 1) позволяют установить, что наблюдаемая на стенке резкая турбулизация потока [7] имеет место и в характеристиках локальных скоростей. В точках потока возникает резкая смена режима движения жидкости: беспульсационное движение жидкости турбулизуется.

3. Турбулизация потока начинается со стенки и распространяется к оси потока. Изображаемое на фиг. 1 время $\Delta t = 0,09$ с показывает, что турбулизация потока распространяется по живому сечению с некоторой скоростью. Учитывая, что время возникновения турбулентности на стенке при тех же начальных давлениях $p = 186,3$ кПа составляет $t_c = 0,36$ с [7], можно утверждать, что процесс турбулизации по живому сечению происходит с нелинейной скоростью.

Л и т е р а т у р а

1. S z u m a n s k i, 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, serie 9, 11.67 (1932), p. 67-107.

2. M a s l i y a h, J.H., S h o o k, C.A. Laminar transient flow in pipes. - The Canadian Journal of Chemical Engineering. October 1975 A 7 53 (5), p. 469-475.

3. П а н ч у р у н Н.А. Распределение скоростей в некоторых случаях нестационарного турбулентного течения в трубах. - "Труды ЛИТВа". Выпуск XLVI, 1963, с. 38-44.

4. К а л м ы к о в а З.А., М о х о в И.Г., П о п о в Д.Н. Экспериментальное исследование профилей местных скоростей при переходных процессах в трубах. Транспортное и энергетическое машиностроение № 2, 1972, с. 61-65.

5. К а с к Э.Г. О балансе энергии при пульсирующих движениях жидкости в трубопроводах. Материалы конференции молодых специалистов по гидроэнергетическому строительству. Бакуми, 1972, с. 39-41.

6. Калишевский Л.Л., Никитушкина Г.П., Стрельцов В.Я. Влияние сильного ускорения потока на распределение скорости в турбулентном пограничном слое со вдувом. Исследование процессов в энергетических установках.- Труды МВТУ, № 207. Выпуск 2, 1975, с. 98-102.

7. Коппель Т.А., Лийв У.Р. Экспериментальное исследование возникновения движения жидкости в трубопроводах. "Механика жидкости и газа". Доклады АН СССР, № 6, 1977, с. 79-85.

8. Каск Э.Г., Коппель Т.А., Корсен В.К., Лийв У.Р., Россманн М.П. Электромагнитные расходомеры с кодированным выходным сигналом для измерения быстропеременных скоростей в трубопроводах. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 380, 1975, с. 45-51.

9. Хаавель Р.Х., Коппель Т.А., Лийв У.Р. Система для накопления и обработки экспериментальных данных гидравлических испытаний. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 380, 1975, с. 37-43.

E. Kask

An Experimental Investigation of the Velocity Distribution in the Cross-section during Starting Period of the Liquid in the Pipe

Summary

Using thermoanemometric apparatus the variation of the velocity profiles during the acceleration period is determined. Drawing a conclusion from the experimental data, until the turbulence is generated, a practically uniform distribution of the velocities in the cross-section is found. Turbulisation of the flow starts from the wall region and is distributed with the nonlinear velocity over the cross-section of the pipe.

ИЗМЕНЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ
ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Экспериментальные работы [1,2] показывают, что при возникновении движения жидкости из состояния покоя, в потоке сохраняется ламинарный режим течения при более больших мгновенных значениях числа Рейнольдса, чем при стационарном движении. В связи в этом большой интерес представляет вопрос о том, как зависит возникновение турбулентности от характеристик нестационарного процесса. Для того, чтобы в самом простом случае найти ответ на поставленный вопрос, в настоящей работе приводятся некоторые экспериментальные данные, полученные в ходе исследования переходных процессов, и определяются взаимоотношения между средней скоростью, при которой теряется устойчивость ламинарного режима течения, и скоростью линейного нарастания давления.

Описание экспериментальной установки приведено в работе [3]. В экспериментах было определено изменение средней скорости движения жидкости во времени $V(t)$ при различных режимах линейного во времени нарастания давления. Моменты перехода к турбулентному течению определены сопоставлением экспериментально полученной средней скорости со средней скоростью, определяемой из теоретического расчета. При этом используется теория ламинарной несжимаемой жидкости.

Опыты, проведенные в рамках работы [2], показывают, что эта математическая модель хорошо описывает изменение средней скорости до появления резкой турбулизации потока на стенке трубы. Следовательно, можно предполагать, что точка расхождения средних скоростей, определенных экспериментально и теоретически, определяет момент турбулизации потока и в этом случае.

Движение несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе описывается уравнением

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right), \quad (I)$$

где v_z - составляющая вектора скорости в направлении оси координат z ;

p - давление;

ρ - плотность жидкости;

μ - коэффициент вязкости;

t - время.

Если ввести безразмерные величины, которые определены следующими соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{z}{L}; \quad \eta = \frac{r}{a}; \quad \tau = \frac{c}{L} t \\ u_\xi &= \frac{v_z}{U}; \quad q = \frac{p}{c\rho U} \\ q^* &= \frac{p^*}{c\rho U}; \quad q^{**} = \frac{p^{**}}{c\rho U}; \quad \varkappa = \frac{L\mu}{a^2 c \rho} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где c - скорость звука в жидкости;

a, L - радиус и длина трубы,

то уравнение (I) можно представить в безразмерном виде [3].

$$\frac{\partial u_\xi}{\partial \tau} - \varkappa \left(\frac{\partial^2 u_\xi}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial u_\xi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial q}{\partial \xi} = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) надо решать при следующих начальных и граничных условиях

$$u_\xi = 0, \quad q = 0 \quad \text{при} \quad \tau = 0, \quad (4)$$

$$q = q^* \quad \text{при} \quad \xi = 0 \quad \left. \vphantom{q = q^*} \right\} \quad (5)$$

$$q = q^{**} \quad \text{при} \quad \xi = L$$

и

$$u_\xi = 0 \quad \text{при} \quad \eta = 1. \quad (6)$$

Средняя по сечению скорость в принятых обозначениях выражается

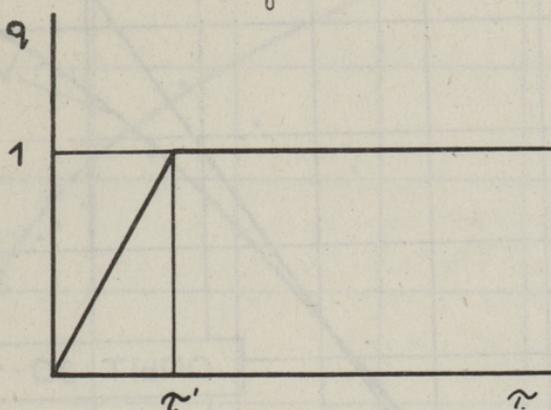
$$V = \frac{2\pi}{\pi a^2} \int_0^a v_z r dr, \quad (7)$$

которую в безразмерных величинах можно представить в виде

$$V = UW, \quad (8)$$

где

$$W = 2 \int_0^1 u_\xi \eta d\eta. \quad (9)$$



Фиг. 1.

Исходя из условий эксперимента изменение во времени безразмерного давления q^* можно представить в виде (Фиг. I)

$$q^* = \frac{1}{\tau'} \tau - \eta (\tau - \tau') \frac{1}{\tau} (\tau - \tau'), \quad (10)$$

а
$$q^{**} = 0.$$

Соответственно

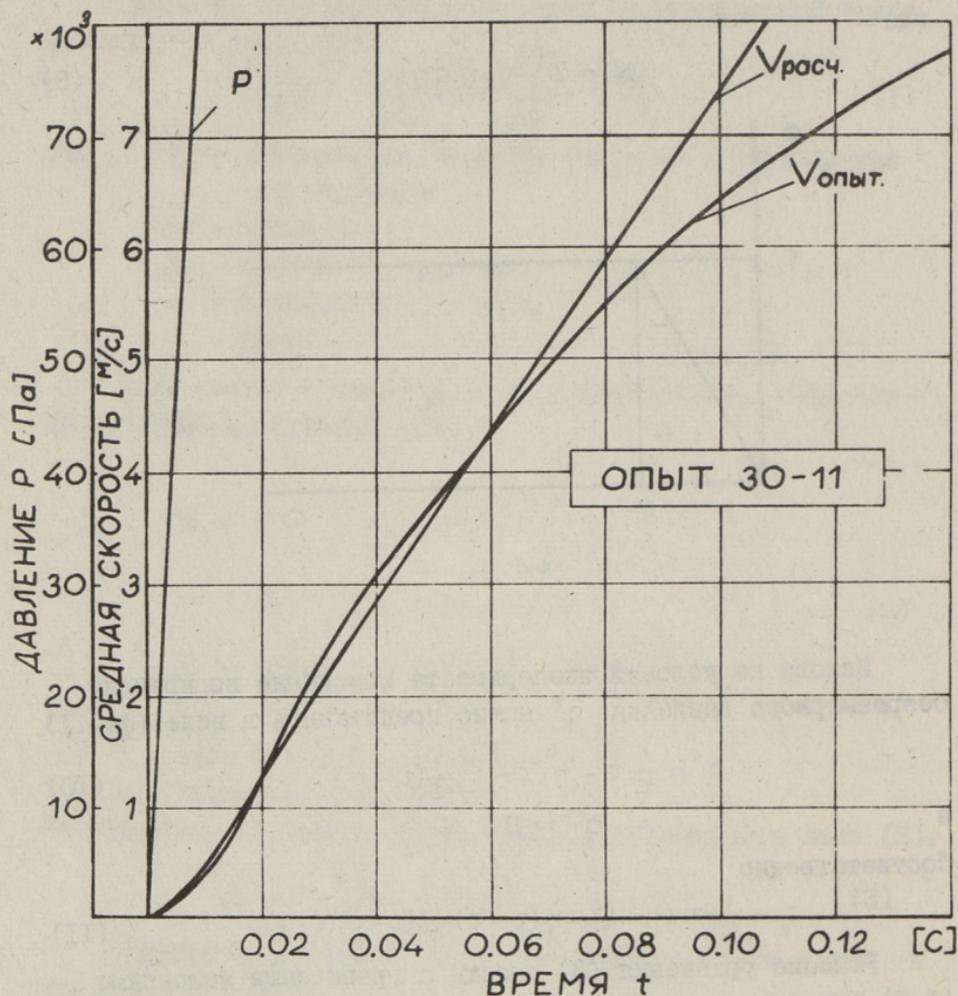
$$q = \frac{1}{\tau'} \tau (1 - \xi) - \eta (\tau - \tau') \frac{1}{\tau} (\tau - \tau') (1 - \xi). \quad (11)$$

Решение уравнения (3) вместе с граничными условиями (4-6) выполнено по аналогии с [4] и выражается в виде

$$W = - \frac{1}{8\pi\tau'} \left(\frac{1}{6\pi} - \tau \frac{32}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k^6} e^{-\pi\lambda_k^2\tau} \right) - \eta (\tau - \tau') \left[- \frac{1}{8\pi\tau'} \left(\frac{1}{6\pi} - \tau + \tau' - \frac{32}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k^6} e^{-\pi\lambda_k^2(\tau - \tau')} \right) \right], \quad (12)$$

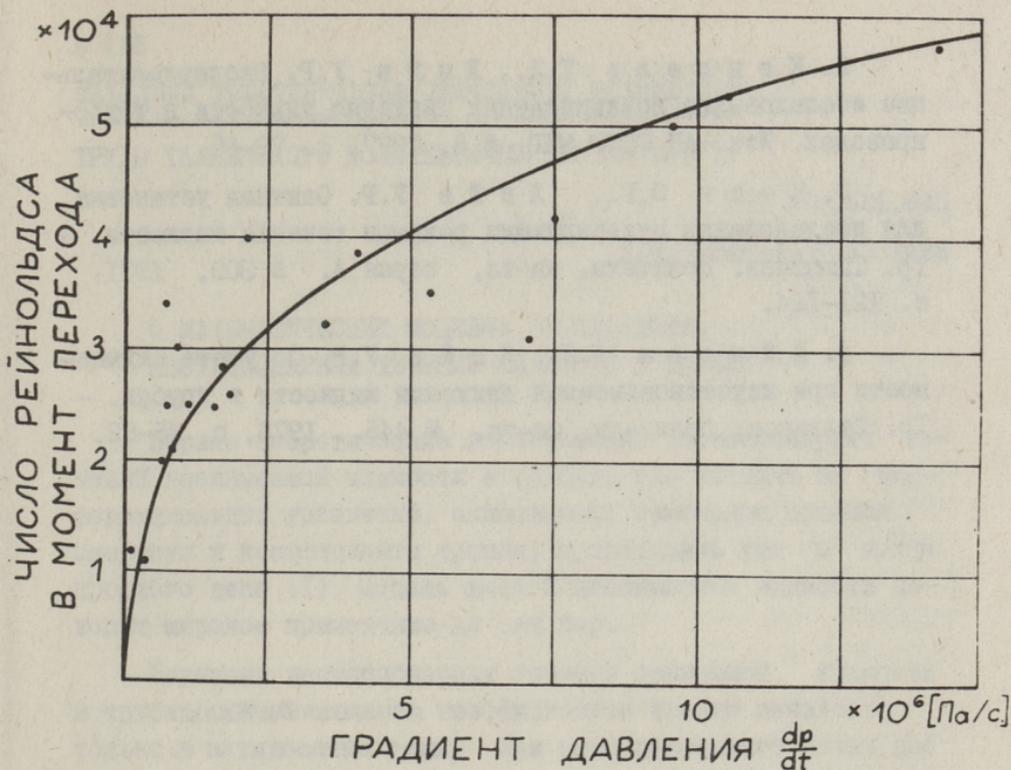
где λ_k - решения уравнения $J_0(\lambda) = 0$, т.е. нули функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

На основе (12) произведены расчеты на ЭВМ "МИР" и определены изменения средней скорости V во времени при различных τ' , соответствующих экспериментальным задачам.



Фиг. 2.

Далее произведено сопоставление значений $V(t)$ для одного опыта. Сравнительные данные представляется на фиг. 2. Как видно, до момента времени $t = 0,06$ с, при котором $V = 4,4$ м/с, значения средней скорости V с удовлетворительной точностью совпадают и расхождение между данными расчета и значениями, полученными из эксперимента, не превышает $\pm 5\%$. Начиная с этой скорости, расхождение увеличивается. Поэтому эту среднюю скорость можно считать скоростью, при которой происходит переход к турбулентному режиму течения.



Фиг. 3.

Таким образом, определенные средние скорости для различных значений скорости линейного нарастания давления представлены на фиг. 3.

Из фиг. 3 следует, что существует определенная зависимость между скоростью прохождения нестационарного процесса, которая характеризуется скоростью нарастания давления, и средней скоростью течения. Причем, большим скоростям нестационарного процесса соответствуют большие средние скорости, при которых происходит переход от ламинарного режима течения к турбулентному режиму течения. Этот результат согласуется с ранее полученным результатом [2].

Л и т е р а т у р а

И. К а с к Э.Г. Экспериментальное исследование распределения скоростей по живому сечению при возникновении движения жидкости в трубопроводе. См. наст. сб. с. 17.

2. К о п ц е л ь Т.А., Л и й в У.Р. Экспериментальное исследование возникновения движения жидкости в трубопроводах. Изв. АН СССР МЖГ, № 6, 1977, с. 79-85.

3. К а с к Э.Г., Л и й в У.Р. Опытная установка для исследования пульсирующих режимов течения жидкости. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, серия А, № 309, 1971, с. 121-124.

4. А й н о л а Л.Я., Л и й в У.Р. Об учете сжимаемости при неустановившемся движении жидкости в трубах. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 445, 1978, с. 45-52.

E. Kask

Variation of the Mean Velocity Depending on the Increase of the Rate of Pressure during Unsteady Liquid Flow in Pipes

Summary

This paper describes the mean velocity variation of the incompressible liquid motion, due to the quick opening valve, located at the upper end of the cylindrical pipe. The valve makes possible various rates of the pressure, but on the other hand these rates are used as initial conditions for theoretical calculations. A good agreement between theoretical and experimental results is visible till a transition from laminar flow to turbulence occurs.

О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Первые теоретические исследования нестационарных течений несжимаемой жидкости в трубах, где исходят из дифференциальных уравнений, описывающих изменения профиля скорости и коэффициента трения, проводились уже в конце прошлого века [1]. Модель вязкой несжимаемой жидкости находит широкое применение до сих пор.

Изучение нестационарных течений сжимаемой жидкости в трубах с изменяющимся коэффициентом трения началось только в пятидесятые годы. При этом применение нашли две модели – модель плоскопараллельного течения [2, 4] и диссипативная модель [5–10]. Хотя модель плоскопараллельного течения является более простой, широкого применения она не нашла, так как эта модель не может быть теоретически обоснована.

При выводе диссипативной модели из уравнений Навье–Стокса применялся метод, по которому постепенно вводится ряд предположений, и на основе их выводится соответствующая упрощенная система дифференциальных уравнений [5–10]. При таком выводе остается неясной "замкнутость" сделанных предположений и полученной модели, а также взаимоотношения между введенными предположениями.

С другой стороны, при помощи обстоятельных исследований нашли характеристики распространения возмущений в цилиндрических трубах по уравнениям Навье–Стокса и в частных случаях при определенных дополнительных упрощающихся предположениях [11–15]. Но в этих работах главное внимание уделяется изучению характеристики распространения возмущений, а не разработке и обоснованию соответствующих упрощенных моделей.

Применяя последний метод в настоящей работе дается систематический вывод и обоснование диссипативной модели.

Для этого на основе линеаризованных уравнений Навье–Стокса для сжимаемой жидкости находятся элементарные решения этих уравнений, соответствующие волновым движениям жидкости в направлении оси трубн. Введя определенные предположения о порядках физических величин и параметров решений и применяя асимптотический анализ, производятся упрощения этих элементарных решений. Приближенные решения, получаемые в результате такого анализа, используются как элементарные решения соответствующей диссипативной модели. Становится ясным, что диссипативная модель основывается на двух предположениях о порядках решений уравнения Навье–Стокса относительно времени и осевой координаты. При этом никакие предположения относительно порядка величины компонентов скорости не выводятся.

В конце работы аналогичное рассуждение приводится в случае несжимаемой жидкости. При этом выясняется, что в этом случае предположение о пренебрежимости компоненты радиальной скорости асимптотически обосновано.

1. Частные решения уравнений Навье–Стокса

Исходим из линеаризованных уравнений Навье–Стокса и неразрывности для осесимметричного движения

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 v_z + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (I.1)$$

$$\rho \frac{\partial v_r}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad (I.2)$$

$$\rho c^2 \theta + \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (I.3)$$

где

$$\theta = \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (I.4)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (I.5)$$

и v_z, v_r – составляющие скорости в направлении осей z, r ;
 p – давление;
 ρ – плотность жидкости;

μ - коэффициент вязкости;
 c - скорость звука в жидкости;
 t - время.

Перейдем к безразмерным координатам ξ, η, τ и безразмерным переменным $u_\xi, u_\eta, \tilde{z}, q$ следующим образом:

$$\xi = \frac{z}{a}, \quad \eta = \frac{r}{a}, \quad \tau = \frac{c}{a} t, \quad (I.6)$$

$$u_\xi = \frac{v_z}{U}, \quad u_\eta = \frac{v_r}{U}, \quad \tilde{z} = \frac{a\theta}{U}, \quad q = \frac{1}{c\rho U} p. \quad (I.7)$$

Здесь a - радиус трубы;
 U - нормирующая скорость.

В новых переменных уравнения (I.1) - (I.3) и соотношения (I.4) - (I.5) принимают вид

$$\beta \frac{\partial u_\xi}{\partial \tau} = -\beta \frac{\partial q}{\partial \xi} + \tilde{\nabla}^2 u_\xi + \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{z}}{\partial \xi}, \quad (I.8)$$

$$\beta \frac{\partial u_\eta}{\partial \tau} = -\beta \frac{\partial q}{\partial \eta} + \tilde{\nabla}^2 u_\eta - \frac{u_\eta}{\eta^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{z}}{\partial \eta}. \quad (I.9)$$

$$\tilde{z} + \frac{\partial q}{\partial \tau} = 0 \quad (I.10)$$

и

$$\tilde{z} = \frac{\partial u_\eta}{\partial \eta} + \frac{u_\eta}{\eta} + \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} \quad (I.11)$$

$$\tilde{\nabla}^2 = \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \quad (I.12)$$

Здесь

$$\beta = \frac{c a}{\nu}, \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (I.13)$$

Рассмотрим частные решения системы (I.8) - (I.11) в виде

$$u_\xi = U_\xi(\eta) e^{i(\omega\tau - k\xi)}, \quad u_\eta = U_\eta(\eta) e^{i(\omega\tau - k\xi)} \quad (I.14)$$

$$\tilde{z} = \Theta(\eta) e^{i(\omega\tau - k\xi)}, \quad q = Q(\eta) e^{i(\omega\tau - k\xi)}$$

Подставляя выражения (I.13) в уравнения (I.8)-(I.11), получаем для определения функций U_ξ, U_η, Θ, Q систему

$$(\tilde{\nabla}^2 - i\omega\beta) U_\xi + ik\beta Q - \frac{1}{3} ik\Theta = 0 \quad (I.15)$$

$$\tilde{\nabla}^2 U_\eta - \left(\frac{1}{\eta^2} + i\omega\beta\right) U_\eta - \beta \frac{dQ}{d\eta} + \frac{1}{3} \frac{d\Theta}{d\eta} = 0 \quad (I.16)$$

$$\Theta + i\omega Q = 0 \quad (I.17)$$

$$\Theta = \frac{dU_\eta}{d\eta} + \frac{1}{\eta} U_\eta - i\kappa U_\xi \quad (\text{I.18})$$

здесь обозначено

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} - \kappa^2. \quad (\text{I.19})$$

Если из системы (I.15) - (I.18) исключить функции Q и Θ , имеем

$$\left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} + D^2\right) U_\xi + E^2 \left(\frac{d}{d\eta} + \frac{1}{\eta}\right) U_\eta = 0, \quad (\text{I.20})$$

$$F^2 \frac{dU_\xi}{d\eta} + \left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} - \frac{1}{\eta^2} + G^2\right) U_\eta = 0, \quad (\text{I.21})$$

где

$$D^2 = -\kappa^2 \left(\frac{4}{3} - \frac{i\beta}{\omega}\right) - i\omega\beta, \quad (\text{I.22})$$

$$E^2 = -i\kappa \left(\frac{1}{3} - i\frac{\beta}{\omega}\right), \quad (\text{I.23})$$

$$F^2 = \frac{i\kappa \left(\frac{1}{3} - i\frac{\beta}{\omega}\right)}{\frac{4}{3} - i\frac{\beta}{\omega}}, \quad (\text{I.24})$$

$$G^2 = -\frac{\kappa^2 + i\omega\beta}{\frac{4}{3} - i\frac{\beta}{\omega}}. \quad (\text{I.25})$$

Из уравнений (I.20), (I.21) получится, что

$$\left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} + C_1^2\right) \left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} + C_2^2\right) U_\xi = 0 \quad (\text{I.26})$$

$$\left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} - \frac{1}{\eta^2} + C_1^2\right) \left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} - \frac{1}{\eta^2} + C_2^2\right) U_\eta = 0, \quad (\text{I.27})$$

где

$$C_1^2 + C_2^2 = D^2 + G^2 - E^2 F^2 \quad (\text{I.28})$$

$$C_1^2 C_2^2 = D^2 G^2. \quad (\text{I.29})$$

Решения уравнений (I.26), (I.27), которые являются конечными при $\eta = 0$, имеют вид

$$U_\xi = A_1 J_0(C_1 \eta) + A_2 J_0(C_2 \eta), \quad (\text{I.30})$$

$$U_\eta = B_1 J_1(C_1 \eta) + B_2 J_1(C_2 \eta). \quad (\text{I.31})$$

Подставляя решения (I.30), (I.31) в систему (I.26), (I.27), получим, что

$$B_1 = m_1 A_1, \quad B_2 = m_2 A_2, \quad (\text{I.32})$$

где

$$m_1 = \frac{C_1 F^2}{G^2 - C_1^2}, \quad m_2 = \frac{C_2 F^2}{G^2 - C_2^2}. \quad (I.33)$$

Из граничных условий при $\eta = 1$

$$u_\xi = 0, \quad u_\eta = 0 \quad (I.34)$$

следует, что

$$A_1 J_0(C_1) + A_2 J_0(C_2) = 0, \quad (I.35)$$

$$m_2 A_1 J_1(C_1) + m_2 A_2 J_1(C_2) = 0. \quad (I.36)$$

Для того, чтобы система (I.35), (I.36) имела решения, должно быть удовлетворено характеристическое уравнение

$$m_1 J_0(C_2) J_1(C_1) - m_2 J_0(C_1) J_1(C_2) = 0. \quad (I.37)$$

Это характеристическое уравнение связывает между собой волновое число k и частоту ω . Уравнение (I.37) имеет бесконечное число решений $k(\omega)$, каждому из которых соответствует определенная форма распространения возмущения — мода.

Характеристическое уравнение (I.37) и соответствующие моды движения хорошо изучены [II-15]. В ряде работ исследованы и упрощены варианты характеристического уравнения (I.37), причем ограничиваются только первой основной модой [12, 13, 15]. В работе [15] дан обзор и сравнение всех имеющихся приближенных методов для описания первой моды распространения возмущения. Там же рассматриваются и т.н. низкочастотные решения, описываемые при помощи диссипативной модели.

2. Низкочастотные решения уравнений Навье-Стокса для сжимаемой жидкости

Введем теперь предположения

$$\left| \frac{\beta}{\omega} \right| \gg 1 \quad \text{или} \quad |\beta| \gg |\omega| \quad (2.1)$$

и

$$|\omega \beta| \gg |k^2|. \quad (2.2)$$

Итак, рассмотрим только такие частные решения (I.14) уравнений (I.8) — (I.11), при которых частоты ω и волновое число k удовлетворяют условиям (2.1), (2.2). Для таких низкочастотных частных решений соотношения (I.22) — (I.25) получают вид

$$D^2 = \frac{i\kappa^2\beta}{\omega} - i\omega\beta, \quad (2.3)$$

$$E^2 = \kappa \frac{\beta}{\omega}, \quad (2.4)$$

$$F^2 = -i\kappa, \quad (2.5)$$

$$G^2 = \omega^2. \quad (2.6)$$

Соответственно из уравнений (I.28), (I.29) получается, что

$$C_1^2 = -i\omega\beta \quad (2.7)$$

$$C_2^2 = \omega^2 - \kappa^2. \quad (2.8)$$

Учитывая оценки (2.1), (2.2) видно, что

$$C_2^2 \ll C_1^2. \quad (2.9)$$

Используя асимптотические разложения для функции Бесселя при малых аргументах и ограничиваясь первыми членами в этих разложениях, имеем

$$J_0(C_2\eta) = 1 \quad (2.10)$$

$$J_1(C_2\eta) = \frac{C_2\eta}{2}. \quad (2.11)$$

Соответственно решения (I.30), (I.31) принимают вид

$$U_\xi = A_1 J_0(C_1\eta) + A_2 \quad (2.12)$$

$$U_\eta = B_1 J_1(C_1\eta) + \frac{1}{2} B_2 C_2\eta. \quad (2.13)$$

По формулам (I.33), (2.3) - 2.6) и уравнениям (I.35) имеются

$$m_1 = \frac{i\kappa}{C_1}, m_2 = -\frac{i\sqrt{\omega^2 - \kappa^2}}{\kappa} \quad (2.14)$$

и

$$A_2 = -A_1 J_0(C_1). \quad (2.15)$$

Учитывая соотношения (I.32), (2.14), (2.15), решения (2.12), (2.13) получают вид

$$U_\xi = A_1 [J_0(C_1\eta) - J_0(C_1)] \quad (2.16)$$

$$U_\eta = iA_1 \left[\frac{\kappa}{C_1} J_1(C_1\eta) + \frac{\omega^2 - \kappa^2}{2\kappa} J_0(C_1\eta) \right]. \quad (2.17)$$

Соответствующее характеристическое уравнение, получаемое из уравнения (I.37) при помощи соотношений (2.10), (2.11), (2.14), (2.15), имеет вид

$$\frac{2\kappa^2}{C_1} J_1(C_1) + (\omega^2 - \kappa^2) J_0(C_1) = 0 \quad (2.18)$$

или

$$k^2 = -\frac{\omega^2 J_0(C_1)}{J_2(C_1)}. \quad (2.19)$$

При помощи равенства (2.18) скорость (2.17) принимает вид

$$U_\eta = \frac{ik}{C_1} A_1 [J_1(C_1 \eta) - J_1(C_1) \eta]. \quad (2.20)$$

Найдем еще величины $\Theta(\eta)$ и $Q(\eta)$. При помощи соотношений (I.II), (I.I4), (2.I6), (2.20) имеем

$$\Theta = -\frac{2ki A_1}{C_1} J_1(C_1) \quad (2.21)$$

$$Q = \frac{2k A_1}{\omega C_1} J_1(C_1). \quad (2.22)$$

Из последнего соотношения видно, что давление q не зависит от координаты η .

Надо отметить, что аналогичная методика для исследования движения жидкости в трубах использована и в работе [16]. Но в последней работе при асимптотическом анализе пропущен ряд существенных членов, что приводит к тому, что при формулировке начальных результатов надо было применить искусственные приемы, не связанные с рассматриваемой асимптотикой.

3. Вывод диссипативной модели

Если учитывать оценки (2.1), (2.2) и порядки величин U_ξ, U_η, Θ, Q , получаемых из соотношений (2.I6), (2.20) и (2.22), то уравнения (I.I5) - (I.I8) могут быть упрощены следующим образом

$$\left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} - i\omega\beta \right) U_\xi + ik\beta Q = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{dQ}{d\eta} = 0, \quad (3.2)$$

$$\left(\frac{d}{d\eta} + \frac{1}{\eta} \right) U_\eta - ikU_\xi - i\omega Q = 0. \quad (3.3)$$

Соответствующие исходные уравнения совпадают с уравнениями диссипативной модели [5-10] и имеют вид

$$\frac{\partial^2 U_\xi}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial U_\xi}{\partial \eta} - \beta \frac{\partial U_\xi}{\partial \tau} - \beta \frac{\partial q}{\partial \xi} = 0, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial \eta} = 0, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial U_\eta}{\partial \eta} + \frac{1}{\eta} U_\eta + \frac{\partial U_\xi}{\partial \xi} - \frac{\partial q}{\partial \tau} = 0. \quad (3.6)$$

Из приведенных рассуждений следует, что уравнения (3.4) -- (3.6) получаются из уравнений Навье-Стокса и непрерывности (I.8) - (I.II) при помощи двух предположений (2.1), (2.2) относительно частоты ω и волнового числа k , которые, учитывая соотношения (I.I3), могут быть представлены в виде

$$\frac{c\alpha}{\nu} \gg |\omega| \quad (3.7)$$

и

$$\frac{c\alpha}{\nu} |\omega| \gg |k|^2 \quad (3.8)$$

или

$$\frac{c\alpha}{\nu} \gg |\omega| \gg \frac{\nu |k|^2}{c\alpha}. \quad (3.9)$$

В размерных величинах

$$\omega_1 = \frac{\omega c}{\alpha}, \quad k_1 = \frac{k}{\alpha} \quad (3.10)$$

условия (3.9) имеют вид

$$\frac{c^2}{\nu} \gg |\omega_1| \gg \nu |k_1|^2. \quad (3.11)$$

Важно отметить, что при выводе диссипативной модели нет надобности вводить какие-либо предположения относительно порядка величины компонентов скорости u_η или изменения давления q , как это сделано в работах [5-10, 15].

4. Низкочастотные решения уравнений Навье-Стокса и упрощенная модель для несжимаемой жидкости

Рассмотрим аналогичным образом и случай несжимаемой жидкости и выведем для несжимаемой жидкости математическую модель для описания низкочастотных решений.

При несжимаемости в уравнениях (I.8) - (I.I2) надо взять

$$\nabla = 0. \quad (4.1)$$

Соответственно система (I.I5) - (I.I8) имеет вид

$$(\nabla^2 - i\omega\beta) U_\xi + ik\beta Q = 0, \quad (4.2)$$

$$\left[\nabla^2 - \left(\frac{1}{\eta^2} + i\omega\beta \right) \right] U_\eta - \beta \frac{dQ}{d\eta} = 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{dU_\eta}{d\eta} + \frac{1}{\eta} U_\eta - ik U_\xi = 0. \quad (4.4)$$

Из этих уравнений (4.2) - (4.4) следует, что

$$\left[\tilde{\nabla}^2 - \left(\frac{1}{\eta^2} + i\omega\beta \right) \right] \left[\tilde{\nabla}^2 - \frac{1}{\eta^2} \right] U_\eta = 0. \quad (4.5)$$

Решение уравнения (4.5), которое является конечным при $\eta = 0$, имеет также вид (I.3I), где теперь

$$C_1^2 = -\kappa^2 - i\beta\omega, \quad (4.6)$$

$$C_2^2 = -\kappa^2. \quad (4.7)$$

Из уравнения (4.4) и соотношения (I.3I) получается, что компонента скорости U_ξ имеет также вид (I.30), причем в настоящем случае в соотношениях (I.32) надо взять

$$m_1 = \frac{i\kappa}{C_1}, \quad m_2 = \frac{i\kappa}{C_2}. \quad (4.8)$$

Из граничных условий (I.34) и здесь вытекают уравнения в виде (I.35), (I.36) и характеристическое уравнение (I.37).

Если рассматривать только низкочастотные решения и ввести предположения (2.1), (2.2), то соотношения (4.6) - (4.8) принимают вид

$$C_1^2 = -i\beta\omega, \quad C_2^2 = -\kappa^2 \quad (4.9)$$

и

$$m_1 = \frac{i\kappa}{C_1}, \quad m_2 = 1. \quad (4.10)$$

Соответственно компоненты скорости, давления и характеристического уравнения имеют вид

$$U_\xi = A_1 [J_0(C_1\eta) - J_0(C_1)], \quad (4.11)$$

$$U_\eta = i\kappa A_1 \left[\frac{J_1(C_1\eta)}{J_1(C_1)} - \frac{J_0(C_1)\eta}{2} \right], \quad (4.12)$$

$$Q = -\frac{\omega A_1}{\kappa} J_0(C_1), \quad (4.13)$$

$$\kappa [2J_1(C_1) - C_1 J_0(C_1)] = 0. \quad (4.14)$$

Из уравнения (4.14) следует, что

$$\kappa = 0. \quad (4.15)$$

Учитывая равенство (4.15) из соотношения (4.12) вытекает, что

$$U_\eta = 0. \quad (4.16)$$

Отсюда видно, что в случае несжимаемой жидкости при выводе упрощенной модели предположение

$$u_{\eta} = 0 \quad (4.17)$$

вполне обосновано.

Если учитывать порядок членов в уравнениях (4.2) - (4.4) по соотношениям (2.1), (2.2), (4.11), (4.13), (4.16), можно их упростить к виду

$$\left(\frac{d^2}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} - i\omega\beta \right) u_{\xi} + ik\beta Q = 0, \quad (4.18)$$

$$\frac{dQ}{d\eta} = 0. \quad (4.19)$$

Соответствующее исходное уравнение для описания движения несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе имеет общеизвестный вид

$$\frac{\partial^2 u_{\xi}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial u_{\xi}}{\partial \eta} - \beta \frac{\partial u_{\xi}}{\partial \tau} - \beta \frac{\partial q}{\partial \xi} = 0. \quad (4.20)$$

Здесь предполагается, что

$$\frac{\partial q}{\partial \eta} = 0. \quad (4.21)$$

Л и т е р а т у р а

1. Г р о м е к а И.С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубах. Уч. зап. Казанского ун-та, 1882. Соб. соч. Изд. АН СССР, 1952, 149-171.

2. K i n s l e r, L.E., F l e y, A.R. Fundamentals of acoustics. N.Y., J. Wiley Sons, 1950.

3. S t e p h e n s, R.W.B., B a t e, A.E. Acoustics and vibrational physics. London, Edward Arnold Ltd, 1966.

4. Д ж а я с и н г х е, Л о й т х о й з е р. Гидравлический удар при условии ламинарного течения. Теор. осн. инж. расчетов, 1972, № 2, 219-230.

5. I b e r a l l, A.S. Attenuation of oscillatory pressures in instrument Lines. - J. Res. Nat. Bur. Stand., 1950, 45, pp.85-108.

6. Д ' С у з а, О л д е н б у р г е р. Динамическая характеристика гидравлических трубопроводов. Теор. осн. инж. расч., 1964, № 3, 196-205.

7. Х о л м б о у, Р у л о. Влияние вязкого трения на распространение сигналов в гидравлических линиях. Теор. осн. инж. расч., 1967, № I, 202-209.

8. Д ж а я с и н г х е, Л о й т х о й з е р. Распространение возмущений при течении вязкой жидкости в гидравлическом трубопроводе с упругими стенками. Теор. осн. инж. расч., 1974, № 3, 176-186.

9. Ч а р н ы й И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М., Недра, 1975.

10. П о п о в Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М., Машиностроение, 1977.

11. Г е р л а х, П а р к е р. Распространение волн в гидравлической линии с вязкой жидкостью с учетом влияния высших форм. Теор. осн. инж. расч., 1967, № 4, 100-107.

12. T i j d e m a n, H. Remarks on the frequency response of pneumatic lines. - J. Basic Engng., Trans. ASME, ser. D, 1969, N 2, pp. 325-327.

13. R u b i n o v, S.I., K e l l e r, J.B. Wave propagation in a fluid filled tube. - J. Aconst. Soc. An., 1971 50, N 1, pp. 198-223.

About Mathematical Models for Unsteady Liquid
Flow Studies in Tubes

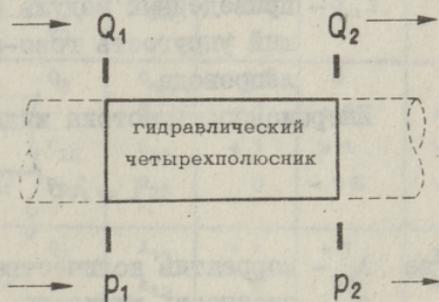
Summary

While studying unsteady compressible liquid flow in tubes the dissipation model is widely used. In the present work a systematic derivation and motivation of the dissipation model is given. On the ground of linearized equations of Navier-Stokes for compressible liquids the elementary solutions at the fixed limits are found. The analysis of these solutions indicates that the dissipation model is based on the two suppositions about the order of change dependence on the time and axial coordinate solutions of Navier-Stokes equations. When using simplified model of the compressible liquid, the radial components of velocities must not be dropped, while with incompressible liquids the drop is well-grounded.

ЧЕТЫРЕХПОЛУСНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТРАСС ГИДРОПРИВОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Гидравлические трассы гидроприводов можно рассматривать состоящими из участков трубопроводов, из местных гидравлических сопротивлений и из местных емкостей. Математические модели динамики таких элементов целесообразно представить в виде четырехполосников [1], что позволяет вести расчет частотных характеристик гидравлических трасс поэтапно. Поэтапный расчет наиболее просто осуществить с использованием метода сигнальных графов [2]. Расчетная схема гидравлических трасс изображается тогда в виде цепочки сигнальных графов четырехполосников. Поэтапный расчет сводится к упрощению графа путем последовательной замены двух соседних четырехполосников одним результирующим четырехполосником.

Часть гидравлической одномерной трассы, рассматриваемой по отношению к двум параметрам попарно (например, давление p в паре со средним объемным расходом Q , в любых двух различных сечениях 1-1 и 2-2 трассы называем гидравлическим четырехполосником. Из принятых пар параметров, например, Q_1 и p_1 , Q_2 и p_2 (на фиг. 1 показаны стрелками их положительные направления) любые два могут быть независимыми, а остальные два являются зависимыми, определяемыми системой из двух уравнений. Существует шесть возможных форм уравнений для четырехполосника.



Фиг. 1. Схема гидравлического четырехполосника.

Каждую форму линейных уравнений четырехполюсника можно отобразить сигнальным графом (табл. I, графы I, 2 и 3).

Элементами гидравлических трасс с сосредоточенными параметрами являются: объемная упругость C , инерционность потока жидкости L и гидравлическое сопротивление по объемному расходу R или гидравлическая проводимость $G = 1/R$. Значения линейных передач сигнальных графов четырехполюсников элементов для всех шести форм уравнений приведены в табл. I, графы 5, 6 и 7 (S - оператор Лапласа).

Передачи сигнальных графов некоторых возможных сочетаний элементов

$$(L-R, C-L, L-C, C-R, C/2-L-C/2,$$

$$C/2-R-C/2, L/2-C-L/2, R/2-C-R/2,$$

$$C-L-R, L-R-C, L/2-R/2-C-L/2-R/2,$$

$$C/2-L-R-C/2)$$

в виде произведения типовых передаточных функций приведены в [1].

Характерные параметры элементов в линеаризованном виде для расчета малых колебаний, определяются следующим образом.

Объемная упругость жидкости

$$C = \frac{V}{E_{np}}, \quad (1)$$

где V - объем жидкости элемента;

E_{np} - приведенный модуль объемной упругости, учитывающий упругость газо-жидкостной смеси и стенок маслопровода.

Инерционность потока жидкости

$$L = \lambda \rho \int_0^l \frac{dx}{f}, \quad (2)$$

где λ - корректив количества движения;

ρ - плотность жидкости;

x, l - продольная координата и длина потока;

f - площадь поперечного сечения потока.

Местное гидравлическое сопротивление

$$R = \frac{d(p_1 - p_2)}{dQ}, \quad (3)$$

где $(p_1 - p_2)$ - перепад давления в местном сопротивлении;
 Q - объемный расход через местное сопротивление.

Таблица 1

Линейные передачи сигнальных графов четырехполюсников элементов гидравлических цепей с сосредоточенными параметрами

Форма уравнений четырехполюсника	Уравнения четырехполюсника	Сигнальный граф четырехполюсника	Обозначения передач	Значения передач сигнального графа элемента		
				C	L	R
1	2	3	4	5	6	7
Z	$P_1 = Z_{11}Q_1 + Z_{12}Q_2$ $P_2 = Z_{21}Q_1 + Z_{22}Q_2$		Z_{11} Z_{12} Z_{21} Z_{22}	$+\frac{1}{CS}$ $-\frac{1}{CS}$ $+\frac{1}{CS}$ $-\frac{1}{CS}$	-	-
Y	$Q_1 = Y_{11}P_1 + Y_{12}P_2$ $Q_2 = Y_{21}P_1 + Y_{22}P_2$		Y_{11} Y_{12} Y_{21} Y_{22}	-	$+\frac{1}{LS}$ $-\frac{1}{LS}$ $+\frac{1}{LS}$ $-\frac{1}{LS}$	$+\frac{1}{R}$ $-\frac{1}{R}$ $+\frac{1}{R}$ $-\frac{1}{R}$
H	$P_1 = H_{11}Q_1 + H_{12}P_2$ $Q_2 = H_{21}Q_1 + H_{22}P_2$		H_{11} H_{12} H_{21} H_{22}	0	$+LS$ $+1$ $+1$ 0	$+R$ $+1$ $+1$ 0
G	$Q_1 = G_{11}P_1 + G_{12}Q_2$ $P_2 = G_{21}P_1 + G_{22}Q_2$		G_{11} G_{12} G_{21} G_{22}	$+CS$ $+1$ $+1$ 0	0 $+1$ $+1$ $-LS$	0 $+1$ $+1$ $-R$
A	$P_1 = A_{11}P_2 + A_{12}Q_1$ $Q_1 = A_{21}P_2 + A_{22}Q_2$		A_{11} A_{12} A_{21} A_{22}	$+1$ 0 $+CS$ $+1$	$+1$ $+LS$ 0 $+1$	$+1$ $+R$ 0 $+1$
B	$P_2 = B_{11}P_1 + B_{12}Q_1$ $Q_2 = B_{21}P_1 + B_{22}Q_1$		B_{11} B_{12} B_{21} B_{22}	$+1$ 0 $-CS$ $+1$	$+1$ $-LS$ 0 $+1$	$+1$ $-R$ 0 $+1$

Нелинейные местные гидравлические сопротивления могут быть подвергнуты гармонической линеаризации.

Реальные звенья гидравлических трасс имеют свойства всех элементарных звеньев (C, L, R) одновременно. Передачи сигнальных графов четырехполюсников такого комбинированного звена CLR приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Передачи сигнальных графов четырехполюсников комбинированного звена CLR гидравлических трасс

Форма уравнений четырехполюсника	П е р е д а ч и			
	W_{11}	W_{12}	W_{21}	W_{22}
Z	$\frac{1}{CS}$	$-\frac{1}{CS}$	$\frac{1}{CS}$	$-\frac{1}{CS}$
Y	$\frac{1}{LS+R}$	$-\frac{1}{LS+R}$	$\frac{1}{LS+R}$	$-\frac{1}{LS+R}$
H	$LS+R$	1	1	$-CS$
G	CS	1	1	$-(LS+R)$
A	1	$LS+R$	CS	1
B	1	$-(LS+R)$	$-CS$	1

По передачам, приведенным в табл. 2, могут быть рассчитаны частотные характеристики труб для частот $\omega < 1,4 \times 10^3 / l$ 1/с, где l - длина трубы в метрах [3].

Характерные параметры труб для передач по табл. 2 при ламинарном режиме течения:

$$C = \frac{f \cdot l}{E_{np}}, \quad L = \frac{\rho l}{f} \lambda, \quad R = \frac{8\pi \mu l}{f^2} \kappa, \quad (4)$$

где f - площадь поперечного сечения трубы;

l - длина трубы;

μ - динамическая вязкость жидкости;

λ, κ - коррективы, учитывающие изменение инерционности и сопротивления при деформации эпюры местных ско-

ростей в нестационарном течении, имеющие значения [4]

$$\lambda = \frac{4\bar{\omega}}{(1-2\sqrt{\bar{\omega}}+4\bar{\omega})},$$

$$\kappa = \frac{\bar{\omega}(4\bar{\omega}-\sqrt{\bar{\omega}})}{(1-2\sqrt{\bar{\omega}}+4\bar{\omega})(2\sqrt{\bar{\omega}}-1)} \quad \text{при } \bar{\omega} > 1$$

и $\lambda = 4/3$, $\kappa = 1$ при $\bar{\omega} \leq 1$,
в которых $\bar{\omega} = \frac{\omega f}{8\pi\nu}$ - безразмерная частота колебаний, ω - частота, ν - кинематическая вязкость жидкости.

По передачам табл. 2 могут быть также рассчитаны частотные характеристики объемных упругостей при одновременном учете их инерционности (звено CL , $R = 0$) или местных гидравлических сопротивлений при одновременном учете их инерционности (звено LR , $C = 0$).

Т а б л и ц а 3

Передачи сигнальных графов четырехполосников
труб с распределенными параметрами

Форма уравнений четырехполосника	П е р е д а ч и			
	W_{11}	W_{12}	W_{21}	W_{22}
Z	$\frac{Z_B}{th\gamma l}$	$-\frac{Z_B}{sh\gamma l}$	$\frac{Z_B}{sh\gamma l}$	$-\frac{Z_B}{th\gamma l}$
Y	$\frac{1}{Z_B th\gamma l}$	$-\frac{1}{Z_B sh\gamma l}$	$\frac{1}{Z_B sh\gamma l}$	$-\frac{1}{Z_B th\gamma l}$
H	$Z_B th\gamma l$	$\frac{1}{ch\gamma l}$	$\frac{1}{ch\gamma l}$	$-\frac{th\gamma l}{Z_B}$
G	$\frac{th\gamma l}{Z_B}$	$\frac{1}{ch\gamma l}$	$\frac{1}{ch\gamma l}$	$-Z_B th\gamma l$
A	$ch\gamma l$	$Z_B sh\gamma l$	$\frac{sh\gamma l}{Z_B}$	$ch\gamma l$
B	$ch\gamma l$	$-Z_B sh\gamma l$	$-\frac{sh\gamma l}{Z_B}$	$ch\gamma l$

В таблице 3 приведены передачи сигнальных графов четырехполосников труб с распределенными параметрами [5,3].

Входящие в передачи по табл. 3 параметры для расчета частотных характеристик [3]:

$\gamma = \frac{1}{l} \sqrt{(R + j\omega L)j\omega C}$ - коэффициент распространения волны;

$Z_B = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}}$ - волновое сопротивление.

Характерные параметры C, L, R определяются по формулам (4).

Для передач четырехполюсников труб по табл. 3 предложены выражения аппроксимации, состоящие из передач типовых звеньев, которые дают хорошее соответствие в низкочастотном диапазоне с учетом первого резонансного пика (таблица 4) [6].

Если определены передачи сигнального графа четырехполюсника какой-то формы представления, то передачи сигнальных графов четырехполюсников других форм могут быть получены с использованием формул перевода. Но необходимо иметь в виду, что формулам перевода не полностью подчиняются передачи комбинированного звена CLR (табл. 2) и передачи аппроксимации труб с распределенными параметрами (табл. 4).

В конкретных схемах гидроприводов гидравлические трассы стыкуются с гидравлическими силовыми агрегатами и с гидроаппаратурой. Формы представления четырехполюсников стыкуемых элементов трасс следует выбрать по требуемым независимым и зависимым переменным. Но при исследовании частотных характеристик только гидравлических трасс целесообразно выбрать все четырехполюсники элементов с одной формой уравнений.

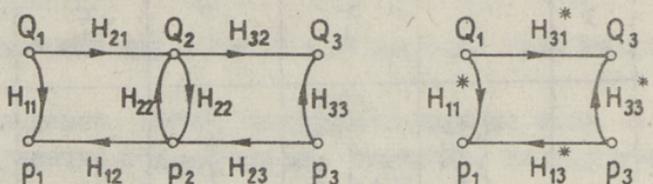
В качестве основной принята форма уравнений "Н" четырехполюсников элементов трасс, которая имеет передачу для всех элементарных звеньев (см. табл. I). Эта форма чаще остальных форм может быть использована при составлении сигнального графа всего гидропривода.

Следует иметь в виду, что проще всего выполняется расчет частотных характеристик гидравлических трасс с использованием форм уравнений четырехполюсников "А" или "В". Сигнальный граф гидравлической трассы не имеет при этом петель. Но расчет систем гидроприводов не осуществим с элементами трасс, выраженными формами уравнений "А" или "В", учитывая независимость обоих параметров в конце или нача-

Передачи, аппроксимирующие передачи труб с распределенными параметрами с учетом первого резонансного пика

Форма уравнений четырех-полюсника	Передачи			
	W_{11}	W_{12}	W_{21}	W_{22}
Z	$\frac{1}{CS} \frac{4LC}{\pi^2} (S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{4LC}) \frac{\frac{\pi^2}{LC}}{S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{LC}}$	$-Z_{21}$	$\frac{\frac{\pi^2}{LC}}{\frac{1}{CS} S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{LC}}$	$-Z_{11}$
Y	$\frac{\frac{1}{L} \frac{R}{S + \frac{R}{L}}}{\frac{4CL}{\pi^2} (S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{4LC})} \frac{\frac{\pi^2}{LC}}{S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{LC}}$	$-Y_{21}$	$\frac{\frac{\pi^2}{LC}}{S + \frac{R}{L} \frac{1}{S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{LC}}}$	$-Y_{11}$
H	$\frac{S + \frac{R}{L}}{\frac{1}{L}} \frac{\frac{\pi^2}{4LC}}{S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{4LC}}$	H_{21}	$\frac{\frac{\pi^2}{4LC}}{S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{4LC}}$	$-G_{11}$
G	$CS \frac{\frac{\pi^2}{4LC}}{S^2 + \frac{R}{2L} S + \frac{\pi^2}{4LC}}$	H_{21}	H_{21}	$-H_{11}$
A	$\frac{1}{H_{21}}$	$\frac{1}{Y_{21}}$	$\frac{1}{Z_{21}}$	$\frac{1}{H_{21}}$
B	$\frac{1}{H_{21}}$	$-\frac{1}{Y_{21}}$	$-\frac{1}{Z_{21}}$	$\frac{1}{H_{21}}$

ле трассы. В реальных условиях независимо можно задаваться только одним из параметров в сечении.



Фиг. 2. Преобразование сигнального графа с двумя четырехполюсниками формы "Н" в сигнальный граф с одним четырехполюсником формы "Н".

При поэтапном расчете частотных характеристик гидравлических трасс два соседних четырехполюсника с формой уравнений "Н" (фиг. 2, а) последовательно заменяются одним четырехполюсником такой же формы "Н" (фиг. 2, б).

Передачи преобразованного сигнального графа (см. фиг. 2) по формуле Мейсона (S.J. Mason) [2]:

$$\left. \begin{aligned} H_{11}^* &= H_{11} + \frac{H_{21} H_{22}' H_{12}}{D}, \\ H_{13}^* &= \frac{H_{23} H_{12}}{D}, \\ H_{31}^* &= \frac{H_{21} H_{32}}{D}, \\ H_{33}^* &= H_{33} + \frac{H_{23} H_{22} H_{32}}{D}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $D = 1 - H_{22} H_{22}'$.

Формулы перевода передач четырехполюсников из формы уравнений "Н" в остальные формы приведены в табл. 5, где определитель

$$|N| = H_{11} H_{22} - H_{12} H_{21}. \quad (7)$$

Приведенные четырехполюсные модели гидравлических элементов используются при расчете частотных характеристик гидравлических трасс гидроприводов [7].

Т а б л и ц а 5

Передачи сигнальных графов четырехполосников, выраженных через передачи четырехполосников с формой уравнений "H"

Форма уравнений четырехполосника	П е р е д а ч и			
	W_{11}	W_{12}	W_{21}	W_{22}
Z	$\frac{ H }{H_{22}}$	$\frac{H_{12}}{H_{22}}$	$\frac{-H_{21}}{H_{22}}$	$\frac{1}{H_{22}}$
Y	$\frac{1}{H_{11}}$	$\frac{-H_{22}}{H_{11}}$	$\frac{H_{21}}{H_{11}}$	$\frac{ H }{H_{11}}$
G	$\frac{H_{22}}{ H }$	$\frac{-H_{12}}{ H }$	$\frac{-H_{21}}{ H }$	$\frac{H_{11}}{ H }$

Л и т е р а т у р а

1. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Расчет передаточных функций сигнальных графов четырехполосников звеньев гидромеханических цепей гидроприводов металлорежущих станков. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Серия А, № 317, 1971, с. 131-145.

2. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Применение теорий многополосников и сигнальных графов к расчету частотных характеристик объемных гидроприводов на ЭЦВМ. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 391, 1975, с. 3-16.

3. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Расчет частотных характеристик труб с распределенными параметрами гидравлических приводов металлорежущих станков. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 317, 1971, с. 147-156.

4. П о п о в Д.Н. Динамика гидро- и пневмоприводов с распределенными по пространственным координатам параметрами. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. - Сб. статей, вып. 6. Под ред. Е.В. Герц. М., Машиностроение, 1979, с. 147-153.

5. Ш о р и н В.П. Применение направленных графов к расчету вынужденных колебаний давления в гидравлических си-

стемах летательных аппаратов и двигателей. Изв. вуз. Авиационная техника № 4, Казань, 1966.

6. Гроссшмидт Г.Т., Ванавески Ю.И. Расчет частотных характеристик труб с сосредоточенными параметрами гидравлических приводов металлорежущих станков. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Серия А, № 317, 1971, с.157-166.

7. Гроссшмидт Г.Т., Ванавески Ю.И., Сакариас А.А. Расчет частотных характеристик гидравлических трасс гидроприводов с применением ЭВМ. См. наст. сб., с. 51.

G. Grossschmidt

Die Vierpolmodelle der Elemente der hydraulischen Leitungen der Ölhydrauliksysteme für Frequenzkennlinienberechnung

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden die Varianten von Vierpolelementenmodellen der hydraulischen Leitungen (Volumenachgiebigkeit, Stromträchtigkeit, hydraulischer Widerstand, Rohre mit verteilten und konzentrierten Parametern) betrachtet. Es werden Formeln für die Berechnung der Übertragungsfunktionen bei Reihenverknüpfung der Elemente dargestellt.

Г.Т. Гроссшмидт, Ю.И. Ванавески, А.А. Сакариас

РАСЧЕТ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ТРАСС ГИДРОПРИВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ

Для расчета частотных характеристик гидравлических трасс на ЭВМ "Минск-32" составлена универсальная программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН.

Гидравлические трассы рассматриваются состоящими из трех типов элементов:

1) трубы с распределенными параметрами (передачи по [1], табл. 3);

2) местные диафрагмообразные гидравлические сопротивления, обладающие сопротивлением R и инерционностью L (передачи по [1], табл. 2, $C = 0$);

3) местные гидравлические объемные упругости C (передачи по [1], табл. 1).

Значения сопротивления R определяются в зависимости от режима течения жидкости. Критические числа Рейнольдса, соответствующие переходу от ламинарного к переходному режиму (Re_1) и от переходного к турбулентному режиму (Re_2) для круглого отверстия [2]:

$$Re_1 = 4,5 \left(\frac{4}{3} + \frac{l}{r} \right), \quad Re_2 = 70 \left(\frac{4}{3} + \frac{l}{r} \right), \quad (1)$$

где l , r — длина и радиус круглого отверстия.

Критические расходы, соответственно, определяются:

$$Q_1 = \frac{Re_1 \nu \pi r}{2}, \quad Q_2 = \frac{Re_2 \nu \pi r}{2}. \quad (2)$$

Значениями гидравлических сопротивлений круглого отверстия приняты:

для ламинарного режима течения [2]

$$R_1 = \frac{8\mu\left(\frac{4}{3} + \frac{l}{r}\right)}{\pi r^3}; \quad (3)$$

для турбулентного режима течения

$$R_T = \frac{\xi \rho Q_0}{f^2}, \quad (4)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления;
 ρ — плотность жидкости;
 Q_0 — стационарный объемный расход;
 f — площадь проходного сечения сопротивления;

для переходного режима течения в виде линейной аппроксимации

$$R_n = R_1 + \frac{R_2 - R_1}{Q_2 - Q_1} (Q_0 - Q_1), \quad (5)$$

где критическое сопротивление

$$R_2 = \frac{\xi \rho Q_2}{f^2}. \quad (6)$$

Инерционность местного сопротивления в виде круглого отверстия [2]

$$L = \rho \frac{l + 1,6r}{f \varepsilon}, \quad (7)$$

где ε — коэффициент сжатия струи.

Основной программой является составленная на языке ФОРТРАН программа ТРАСС. Программа использует ввод исходных данных с перфокарт. Все исходные данные каждого звена перфорируются на одной перфокарте. Каждый тип звена имеет свой код. Последовательность подключения звеньев цепи задается последовательностью расположения карт исходных данных. В зависимости от кода звена программа подготавливает данные и организует массивы, используемые в подпрограммах ЕС, RL, ТРУБА при расчете передач четырехполосников соответствующих звеньев.

Расчет частотных характеристик цепи начинается с задания цикла по частотам и установления единичного четырехполосника. Следует расчет передач четырехполосника с формой уравнений "Н" для заданного первого звена и суммирование единичного четырехполосника с первым четырехполосником [1], формулы (5). Далее рассчитываются по циклу

Простейшие соотношения между амплитудно- и фазо-частотными характеристиками
передач линейных четырехполюсников гидравлических трасс

Пере- дачи	Ампли- туда Фаза F	Форма уравнений четырехполюсника			
		Z	Y	H	G
W_{11}	A_{11}	$AZ_{11} = \frac{1}{AG_{11}}$	$AY_{11} = \frac{1}{AH_{11}}$	$AH_{11} = \frac{1}{AY_{11}}$	$AG_{11} = \frac{1}{AZ_{11}}$
	F_{11}	$FZ_{11} = -FG_{11}$	$FY_{11} = -FH_{11}$	$FH_{11} = -FY_{11}$	$FG_{11} = -FZ_{11}$
W_{12}	A_{12}	$AZ_{12} = AZ_{21}$	$AY_{12} = AY_{21}$	$AH_{12} = AH_{21}$	$AG_{12} = AG_{21}$
	F_{12}	$FZ_{12} = FZ_{21} + \pi$	$FY_{12} = FY_{21} + \pi$	$FH_{12} = FH_{21}$	$FG_{12} = FG_{21}$
W_{21}	A_{21}	$AZ_{21} = AZ_{12}$	$AY_{21} = AY_{12}$	$AH_{21} = AH_{12}$	$AG_{21} = AG_{12}$
	F_{21}	$FZ_{21} = FZ_{12} - \pi$	$FY_{21} = FY_{12} - \pi$	$FH_{21} = FH_{12}$	$FG_{21} = FG_{12}$
W_{22}	A_{22}	$AZ_{22} = \frac{1}{AH_{22}}$	$AY_{22} = \frac{1}{AG_{22}}$	$AH_{22} = \frac{1}{AY_{22}}$	$AG_{22} = \frac{1}{AZ_{22}}$
	F_{22}	$FZ_{22} = -FH_{22}$	$FY_{22} = -FG_{22}$	$FH_{22} = -FZ_{22}$	$FG_{22} = -FY_{22}$

передачи четырехполосников последующих звеньев и по одному суммируются с результирующим четырехполосником предыдущих звеньев. В результате получаются вещественные и мнимые частотные характеристики для каждой передачи четырехполосника трассы.

Передачи четырехполосников с формами уравнений Z, Y и G рассчитываются с использованием соответствующих формул перевода (см. [1], табл. 5).

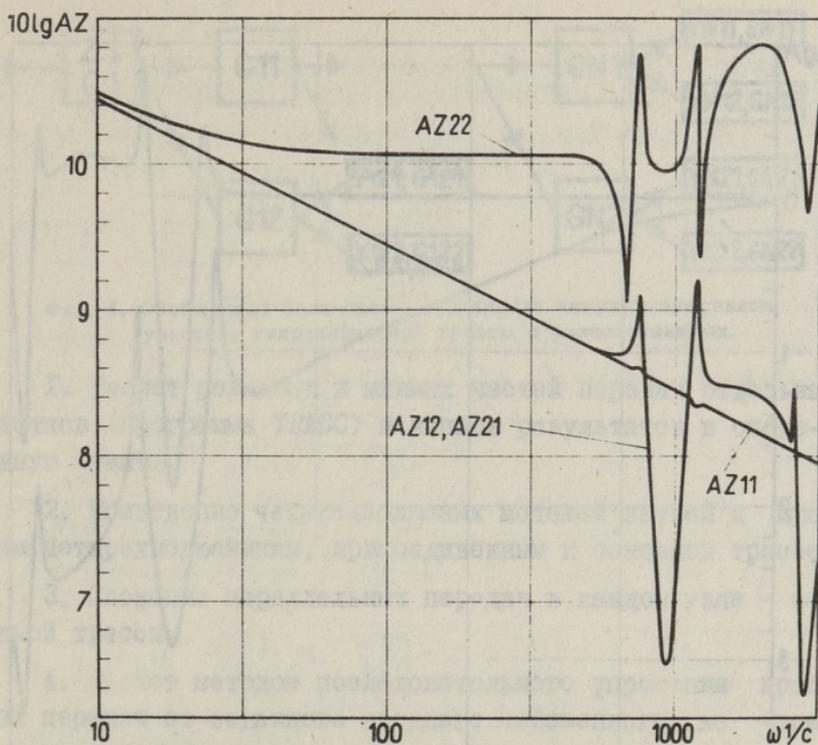
Окончательные результаты выводятся на печать в виде логарифмических амплитудно- и фазо-частотных характеристик передач сигнальных графов с формами уравнений Z, Y, H и G четырехполосников гидравлической трассы. Для расчета амплитуды в децибелах и фазы частотной характеристики любой передачи используется составленная подпрограммой АМФ. Получаются значения характеристик для 16 передач. Из них 8 отличаются значительно, а остальные 8 связаны с первыми по простейшим соотношениям (табл. 1). Обратнопорциональная зависимость амплитудно-частотной характеристики в логарифмическом масштабе — это зависимость с противоположным знаком (например, $10 \lg A Z 11 = -10 \lg A G 11$).

В качестве примера выполнены расчеты частотных характеристик гидравлической трассы: местная объемная упругость (ЕС) — труба с распределенными параметрами (Т1) — местное гидравлическое сопротивление (RL) — труба с распределенными параметрами (Т2).

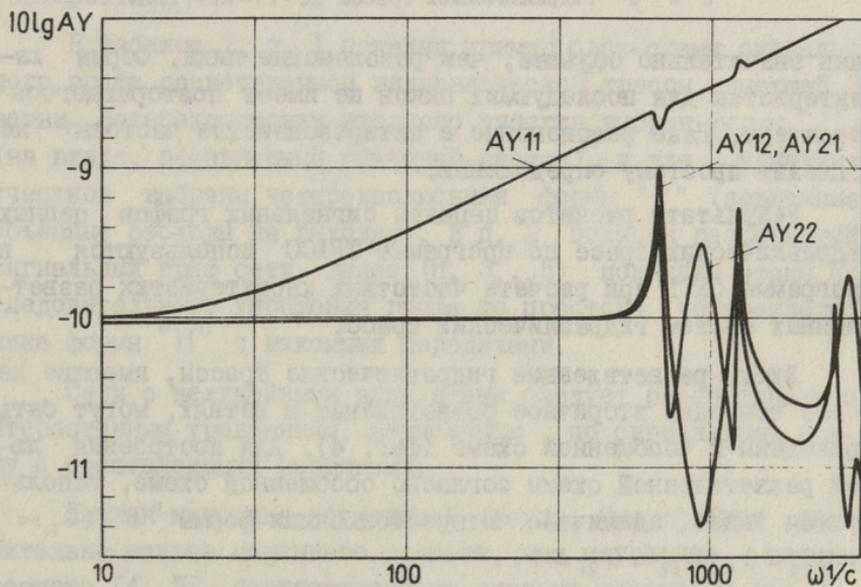
Исходные данные звеньев цепи были приняты следующими: для ЕС — $V = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; для Т1 — $r = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l = 0,5 \text{ м}$; для RL — $r = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $Q_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $\xi = 1,45$, $\varepsilon = 0,62$; для Т2 — $r = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l = 2 \text{ м}$.

Параметры, характеризующие свойства рабочей жидкости, заданы следующими: $\rho = 0,86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,16 \text{ кг/с}\cdot\text{м}$, $E_{\text{пр}} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$.

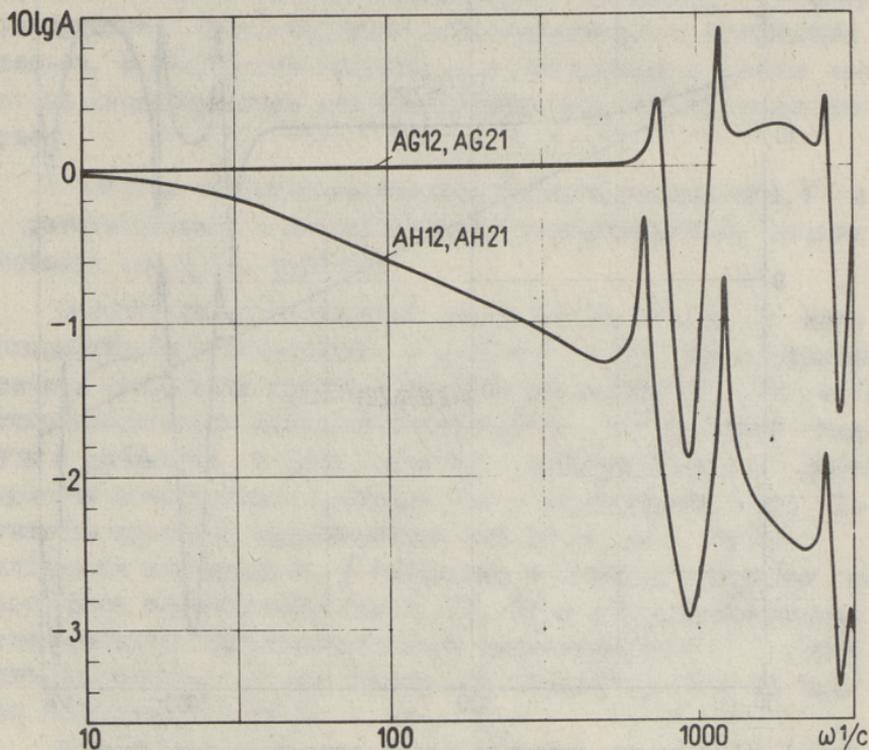
На фиг. 1, 2, 3 показаны полученные логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) рассматриваемой гидравлической трассы. Характеристики в области резонансных и антирезонансных пиков значительно отличаются от характеристик, получаемых для простой трубы с распределенными параметрами [3]. ЛАЧХ всех передач имеют антирезонансные пики, причем эти



Фиг. 1. ЛАЧХ передач сигнального графа четырехполюсника формы Z гидравлической трассы ЕС-Т1-RL-Т2.



Фиг. 2. ЛАЧХ передач сигнального графа четырехполюсника формы Y гидравлической трассы ЕС-Т1-RL-Т2.



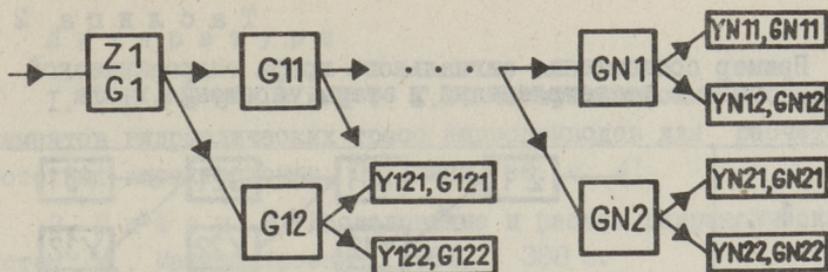
Фиг. 3. ЛАЧХ передач сигнального графа четырехполюсника форм Н и G гидравлической трассы ЕС-Т1-RL-Т2.

пики значительно больше, чем резонансные пики. Форма характеристик для последующих пиков не имеет повторяющегося характера. Даже резонансные и антирезонансные частоты не подлежат простому определению.

Результаты расчетов передач сигнальных графов цепных гидравлических трасс по программе ТРАСС используются в программе СЕТЬ при расчете частотных характеристик разветвленных систем гидравлических трасс.

Любые разветвленные гидравлические трассы, имеющие не более чем одно вторичное разветвление в ветвях, могут быть приведены к обобщенной схеме (фиг. 4). Для построения любой разветвленной схемы согласно обобщенной схеме, используются также единичные четырехполюсники формы "G" ($G_{11} = G_{22} = 0$, $G_{12} = G_{21} = 1$).

Алгоритм программы СЕТЬ, позволяющий выполнить расчеты частотных характеристик по обобщенной схеме, построен в следующей последовательности.



Фиг. 4. Обобщенная блок-схема соединения четырехполюсников участков гидравлической трассы с разветвлениями.

1. Расчет реальных и мнимых частей передач отдельных участков (программа ТРАСС) и запись результатов в оперативную память.

2. Приведение четырехполюсных моделей ветвей к простым четырехполюсникам, присоединенным к основной трассе.

3. Сложение параллельных передач в каждом узле основной трассы.

4. Расчет методом последовательного упрощения графа всех передач от заданного входного переменного ко всем выходным переменным.

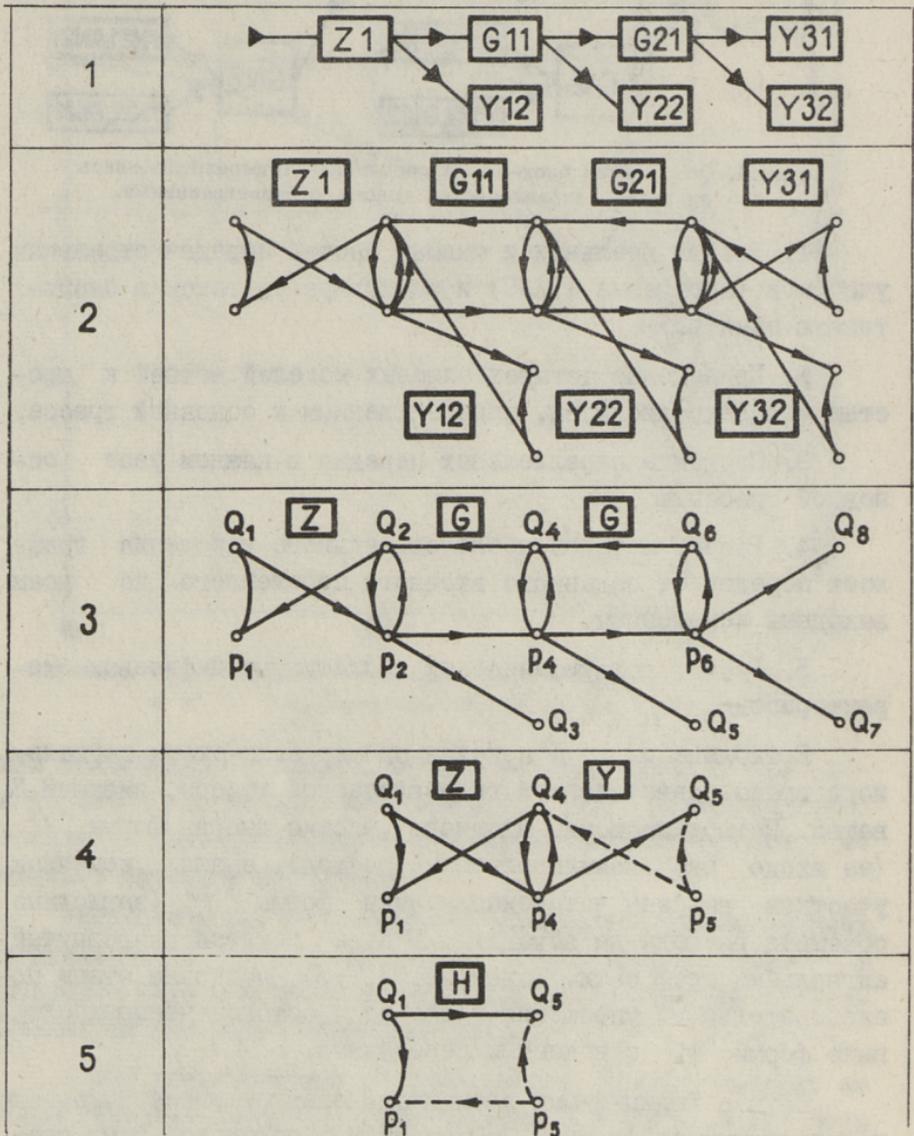
5. Расчет логарифмических амплитудных и фазовых характеристик.

В таблице 2, п. 1 показан пример блок-схемы сигнального графа разветвленной гидравлической трассы, имеющей 3 ветви. Четырехполюсник входного участка выбран формы "Z" (на входе независимый объемный расход), а для конечных участков выбраны четырехполюсники формы "Y" (зависимые объемные расходы на выходах). В п. 2 показан развернутый сигнальный граф сети. Далее (п. 3...5) показаны этапы последовательного упрощения графа до простого четырехполюсника формы "H" с искомыми передачами.

Сети с нелинейными элементами следует рассчитывать по итерационным уравнениям, выписанным по сигнальному графу с расщепленными вершинами.

Данная методика наглядна и проста. Она требует значительно меньше машинного времени, чем матричные методы расчета [4, 5], базирующиеся на системе уравнений для узловых давлений, где матрицы больших размерностей в значительной части заполнены нулями.

Пример составления сигнального графа гидравлической цепи с разветвлениями и этапы упрощения графа



Приведенная методика, реализованная программой расчета на ЭВМ, позволяет использовать полученные результаты в программах расчета частотных характеристик систем объемного гидропривода с учетом разветвленных гидравлических трасс.

Л и т е р а т у р а

1. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Четырехполюсные модели элементов гидравлических трасс гидроприводов для расчета частотных характеристик. См. наст. сб., с. 41.
2. Г и й о н М. Исследование и расчет гидравлических систем. М., Машиностроение, 1964. 388 с.
3. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Расчет частотных характеристик труб с распределенными параметрами гидравлических приводов металлорежущих станков. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 317, 1971, с. 147-156.
4. Р а б и н о в и ч М.И. Методика расчета на ЭВМ неустановившегося движения в сложных линеаризованных гидросистемах с распределенными и сосредоточенными параметрами. - Сб.: Механика машин, вып. 49, М., Наука, 1975, с. 22-31.
5. Л я м а е в Б.Ф., Н е б о л ь с и н Г.П., Н е л ю б о в В.А. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. Методы расчета на ЭВМ. Под ред. Б.Ф. Лямаева. Л., Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. 192 с.

G. Grossschmidt, J. Vanaveski, A. Sakarias

Berechnung der Frequenzkennlinien der hydraulischen Trasse der Ölhydrauliksysteme mit Digitalrechner

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird die Methodik zur Berechnung der Frequenzkennlinien von hydraulischen Ketten, die aus Rohrleitungen, örtlichen hydraulischen Widerständen und örtlichen Volumennachgiebigkeiten bestehen, dargelegt. Es wurde ein Programm zusammengestellt, das gestattet, die Frequenzkennlinien der Signalfussgraphenübertragungen für die Formen Z, Y, H und G der Kettenvierpolmodelle zu errechnen. Es wird die Methodik zur Berechnung der Frequenzkennlinien der komplizierten verzweigten hydraulischen Trasse dargelegt.

Я.Я. Кару, В.В. Реммел, В.Х. Палль

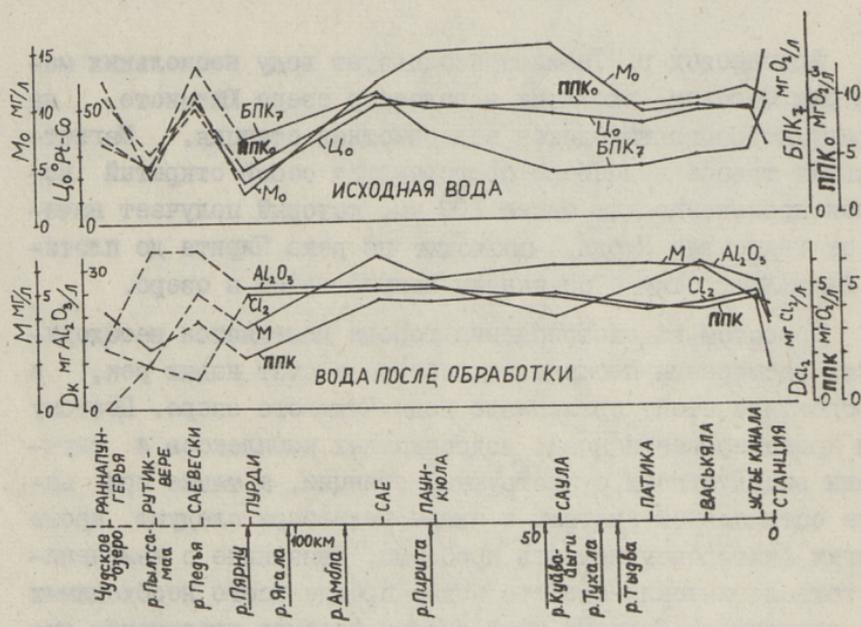
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ
ВОДОИСТОЧНИКА ПРИ РЕШЕНИИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ЗАДАЧ

Водопровод г. Таллина использует воду нескольких малых рек Эстонии, входящих в водосбор озера Юлемисте, на берегу которого находится водоочистная станция. Магистральная трасса водосбора представляет собой открытый водоток протяженностью более 100 км, который получает начало от гидроузла Пурди, проходит по реке Пирита до плотины Васкьяла, откуда по каналу направляется в озеро.

С ростом водопотребления города появляется необходимость расширения площади водосбора за счет новых рек, в перспективе стоит применение воды Чудского озера. Поэтому при проектировании новых водоочистных комплексов и улучшении эксплуатации существующей станции, а также при выборе оптимальной системы и схемы водосбора следует кроме других факторов учитывать проблемы, связанные с изменением технологических свойств воды, прежде всего необходимых доз реагентов. Решение этой задачи требует проведения экспериментальных исследований, которые должны позволить уточнить характер изменения технологических свойств воды между гидроузлом Пурди и озером Юлемисте, а также оценить влияние смещения воды в озере на формирование указанных свойств.

Серия таких опытов проводилась с 18 по 20 сентября 1979 года. На трассе магистрального водотока были выбраны 8 характерных пунктов, кроме того исследовались воды Чудского озера и рек Пылтсамаа и Педья, которые в перспективе также могут быть включены в общую схему водосбора г. Таллина. В каждой точке проводился полный химический анализ воды, были составлены кривые хлоропоглощаемости и определены оптимальные дозы коагулянта.

Коагулирование проб осуществлялось после предварительного хлорирования с добавлением флокулянта — полиакриламида. Доза хлора находилась по графику хлоропоглощаемости с таким расчетом, чтобы обеспечить во всех пробах остаточное содержание активного хлора 0,9 мг/л. После коагулирования отстоянная вода фильтровалась через бумажный фильтр, в фильтрате определялась перманганатная окисляемость.

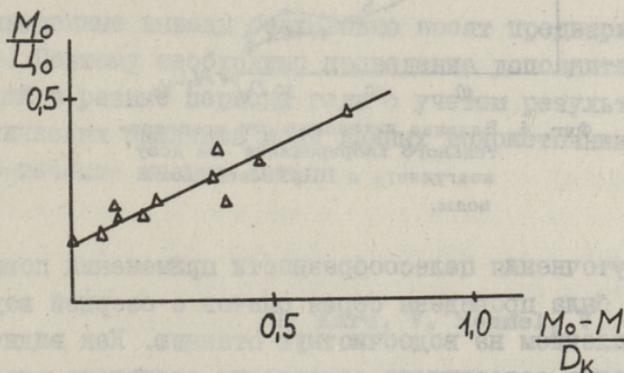


Фиг. 1. Динамика изменения показателей сырой и обработанной вод вдоль трассы магистрального водотока.

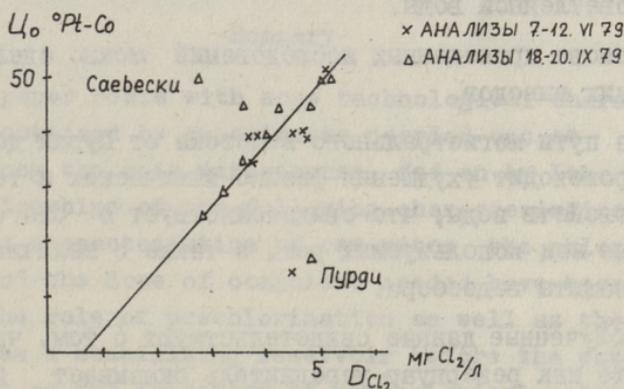
Динамика изменения некоторых основных свойств исходной и коагулированной вод изображена на фиг. I. Как видно из приведенных графиков, на трассе водотока от Пурди до озера не происходит существенных изменений свойств сырой воды, в то время как в самом озере повышаются показатели мутности и БПК₇. Это, видимо, объясняется влиянием слоя донных отложений, которые при ветренной погоде частично взвешиваются, а

также высокой концентрацией клеток планктона. По фигуре I видно также, что озерная вода лучше подвергается реагентной обработке, обеспечивая меньшую остаточную загрязненность и требуя более низких доз хлора и коагулянта, чем вода в магистральном водотоке.

Как показали исследования, эффективность использования коагулянта зависит главным образом от соотношения мутности и цветности исходной воды (фиг. 2), причем предварительный хлор расходуется в основном для устранения цветности воды (фиг. 3).

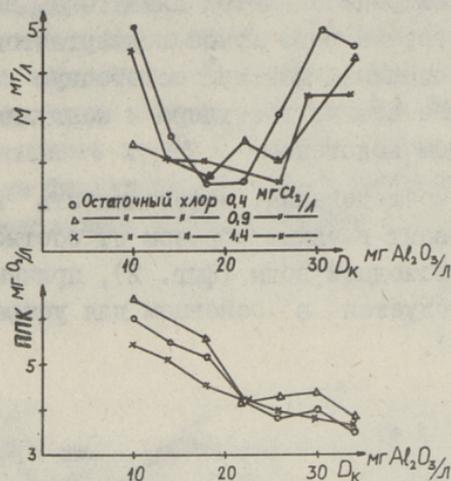


Фиг. 2. Характер изменения эффективности использования коагулянта.



Фиг. 3. Зависимость дозы хлора от цветности исходной воды.

В этом отношении несколько отличаются воды реки Педья, имеющей более высокое содержание БПК₇ (см. фиг. I) и реки Пярну (гидроузел Пурди), процесс хлоропоглощения в которой характеризуется образованием и окислением хлораминов.



Фиг. 4. Влияние интенсивности предварительного хлорирования на дозу коагулянта и ППК осветленной воды.

Для уточнения целесообразности применения повышенных доз хлора была проведена серия опытов с озерной водой перед поступлением на водоочистную станцию. Как видно (фиг. 4), изменение остаточного содержания активного хлора в рассматриваемых пределах (0,4–1,4 мг/л) не вызывает существенного изменения оптимальной дозы коагулянта и свойств осветленной воды.

На основе проведенных исследований можно сделать ряд практических выводов.

1. На пути магистрального водотока от Пурди до Таллина не происходит ухудшения физико-химических и технологических свойств воды, что свидетельствует о благоприятном составе вод используемых рек, а также о наличии санитарной защиты водосбора.

2. Полученные данные свидетельствуют о том, что озеро Юлемисте как резервуар-усреднитель оказывает положительное влияние на обрабатываемость поступающей воды, несмотря на повышение концентрации взвешенных веществ и некоторых других показателей в озерной воде по сравнению с водой в подводящем канале. Поэтому для определения целесообразности непосредственного забора воды из устья кана-

ла необходимо проведение дополнительных исследований с учетом влияния периодов массового развития в озере определенных видов водорослей и т.д.

3. Как показали проведенные лабораторные опыты, повышенные дозы предварительного хлора не обеспечивают существенного улучшения технологических свойств воды.

4. Свойства воды Чудского озера с технологической точки зрения являются весьма благоприятными для использования в качестве источника водоснабжения г. Таллина.

Приведенные выводы безусловно носят предварительный характер. Поэтому необходимо проведение дополнительных исследований в разные периоды года с учетом результатов физико-химических анализов воды данных водисточников, полученных в течение многих лет.

J. Karu, V. Remmel, V. Pall

Some Technological Characteristics of the Water
of a Water Source for Solving Water Economic Problems

Summary

The paper deals with some technological characteristics of water obtained by experiments carried out at several points along the main watercourse, fed on by Lake Ülemiste. The relationships of the following characteristics: the organoleptic characteristics of raw water, the chloradsorbing ability and the dose of coagulant needed have been established. The role of prechlorination as well as the role of the Lake as a stabilizing reservoir before the water treatment plant on the formation of technological water have been examined.

ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ ПРИ БИООКИСЛЕНИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ
ВЕЩЕСТВ

Проведение биологической очистки сточных вод при термофильном режиме ускоряет процессы минерализации (скорость уменьшения БПК на объем аэротенка) и повышает деструкцию патогенных микроорганизмов [1]. В зимних условиях понижение температуры очистных сооружений ведет к уменьшению окисления аммиака. Установлено, что аммиак повышает смертность ценных видов рыб уже при очень низкой концентрации — в пределах 0,003–0,0125 мг неионизированного аммиака в литре [2]. Очистные сооружения, работающие при температурах ниже 5 °С, могут окислять аммиак в сравнительно безвредные нитраты только в незначительном количестве [3].

Нагревание сточных вод внешней энергией связано со значительными затратами. Повышение температуры очищаемой сточной воды можно осуществлять и за счет внутренней энергии загрязняющих веществ.

При окислении органических веществ микроорганизмы активного ила выделяют значительные количества тепла [4].

Зная калорийность индивидуальных химических веществ, можно оценить потенциальное тепловыделение при биологическом окислении стоков различного происхождения. В табл. I приведены калорийность некоторых индивидуальных химических веществ, встречающихся наиболее часто в сточных водах. На основе их химических формул нами рассчитаны потребность в кислороде при полном окислении 1 грамма вещества и тепловыделение при расходе 1000 мг кислорода.

Приведенные в таблице I данные показывают, что при снижении 1000 мг БПК в биологических очистных сооружениях

может теоретически освободиться от 3,23 до 3,56 ккал (или в среднем 3,39 ккал) тепловой энергии.

Полученные нами расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными И.Г. Минкевича и В.К. Ерошина [5] и К.Л. Кууней с соавторами [6]. При расходе 1000 мг кислорода на окисление органических веществ микроорганизмы выделяют 3,38 ккал [5], по другим данным $3,44 \pm 0,31$ ккал [6] теплоэнергии. По данным цитируемых авторов коэффициент пропорциональности усвоения кислорода и тепловыделения (ΔH_f) не зависит от вида микроорганизмов и их скорости размножения.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных цитированных авторов [5, 6] показывает, что со снижением БПК_{полн} на 1000 мг O_2 , сопровождается выделение 3,4 ккал тепловой энергии.

Учитывая цифровое значение коэффициента пропорциональности усвоения кислорода и тепловыделения (ΔH_f) можно определять условия самонагревания сточных вод в аэротенке. Для осуществления этой цели предложим методику определения потенциала самонагревания ($\Pi_{сн}$) и коэффициента термодинамической эффективности аэрационной системы.

Известно, что микроорганизмы не минерализуют органические вещества полностью, так как при росте часть органики превращается в клеточное вещество. Соотношение прироста биомассы микроорганизмов к использованной органике выражается экономическим коэффициентом (Y). Учитывая коэффициент Y , можем выразить тепловыделение микроорганизмами (Q_μ):

$$Q_\mu = \Delta H_f \cdot \Delta \text{БПК}_{\text{полн}} \cdot (1 - Y). \quad (1)$$

Выделенная теплоэнергия аккумулируется в воде ($Q_{ак}$), растрачивается на нагревание продуваемого воздуха (Q_b), на испарение воды ($Q_{исп}$), рассеивается с поверхности аэротенка (Q_p). Учитывая еще тепловыделение от механического агитирования жидкости (Q_a), можем выразить тепловой баланс очистки воды

$$Q_\mu = Q_{ак} - Q_a + Q_p + Q_{исп} + Q_b. \quad (2)$$

При очистке сточной воды величины Q_μ , Q_b и $Q_{исп}$ взаимосвязаны: чем выше БПК сточной воды, тем больше надо рас-

ходовать кислорода воздуха на окисление органических веществ и тем больше образуется тепла. С увеличением массы продуваемого воздуха повышаются и величины Q_b и $Q_{усп}$.

Величины Q_p и Q_d зависят от конструкции очистного сооружения и влияют на потенциал самонагревания ($\Pi_{сн}$) сточной воды в аэротенке.

Т а б л и ц а I

Калорийность индивидуальных органических веществ, расход кислорода для окисления 1 г вещества и тепловыделение при расходе 1000 мг кислорода

Индивидуальные химические вещества	Выделение тепловой энергии при окислении 1 г вещества (ккал)	Источник данных	Расход кислорода на окисление 1 г вещества (г)	Тепловыделение при расходе 1000 мг кислорода (ккал)
глюкоза	3,7	[7]	1,07	3,47
сахароза	4,0	[7]	1,12	3,56
лактоза	3,77	[7]	1,12	3,36
пентоза	3,73	[7]	1,07	3,50
этиловый спирт	7,0	[7]	2,09	3,35
уксусная кислота	3,51	[7]	1,07	3,29
глицерин	4,3	[7]	1,22	3,53
крахмал	4,2	[7]	1,18	3,54
пальмитиновая кислота	9,3	[7]	2,88	3,23
трипальмитин	9,3	[7]	2,88	3,23
белки	5,65	[8]	1,73 ^x	3,26

^x определено на основе среднего элементарного состава белков [9].

$$\Pi_{сн} = Q_{ак} - (Q_d - Q_p). \quad (3)$$

Потенциал самонагревания ($\Pi_{сн}$) выражает потенциальное аккумулярование тепловой энергии в аэротенке при условии $Q_d = Q_p$. Подставив в уравнение (2) значение $\Pi_{сн}$, получим

$$\Pi_{сн} = Q_{\mu} - (Q_b + Q_{усп}), \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что самонагревание сточной воды в аэротенке может происходить лишь в случае

$$Q_{\mu} - (Q_b + Q_{\text{исп}}) > 0$$

или

$$\frac{Q_{\mu}}{Q_b + Q_{\text{исп}}} > 1.$$

Выражая полученное соотношение через коэффициент K_t , который отмечает термодинамическую эффективность аэрационной системы, получаем

$$K_t = \frac{Q_{\mu}}{Q_b + Q_{\text{исп}}}. \quad (5)$$

Для определения потенциальной возможности самонагрева надо определять Q_b и $Q_{\text{исп}}$. Q_b зависит от массы воздуха (M_b), удельной теплоемкости воздуха (C_b) и от входящей (t_1) и выходящей (t_2) температуры воздуха.

$$Q_b = M_b \cdot C_b \cdot (t_2 - t_1). \quad (6)$$

Масса необходимого воздуха (M_b) зависит от степени загрязненности и от эффективности использования атмосферного кислорода (η) аэрационной системой.

При содержании 23,2 % кислорода в атмосфере и выражая η в процентах, масса необходимого воздуха равна:

$$M_b = \frac{\Delta \text{БПК}_{\text{полн}} (1 - \gamma) \cdot 10^4}{23,2 \cdot \eta}. \quad (7)$$

Для определения $Q_{\text{исп}}$ сначала определяем объем продуваемого воздуха V_b . Переходя на абсолютную шкалу температуры ($273,15 + t$ °C), при нормальном давлении и плотности воздуха (d_b) объем равен:

$$V_b = \frac{(273,15 + t) \cdot M_b}{273,15 \cdot d_b}. \quad (8)$$

Используя таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара [10], можем найти удельный объем сухого насыщенного пара (v'') в литрах при температуре t и определить его общую массу в граммах (M_{nt}) в объеме V_b :

$$M_{nt} = \frac{V_b}{v''}. \quad (9)$$

Учитывая массу водяного пара в входящем (M_{nt_1}) и в выходящем воздухе (M_{nt_2}), можем определить массу испаренной воды ($M_{\text{исп}}$):

$$M_{\text{исп}} = M_{nt_2} - M_{nt_1}. \quad (10)$$

Масса водяного пара в входящем воздухе зависит от концентрации насыщения водяного пара при температуре t_1 и от

релятивной влажности (R_{t_1}). Выходящий из аэротенка воздух можно считать насыщенным водяным паром. Таким образом:

$$M_{\text{усн}} = \frac{(273,15 + t_2) \cdot M_b}{273,15 \cdot d_b \cdot v_{t_2}''} - \frac{(273,15 + t_1) R_{t_1} \cdot M_b}{273,15 \cdot d_b \cdot v_{t_1}''}. \quad (\text{II})$$

Определяя по таблицам [10] скрытую теплоту парообразования (r) в калориях при температуре t_2 , можем через уравнение (I2) определить теплоту испарения ($Q_{\text{усн}}$):

$$Q_{\text{усн}} = \frac{M_b \cdot r_{t_2}}{273,15 \cdot d_b} \cdot \left[\frac{273,15 + t_2}{v_{t_2}''} - \frac{(273,15 + t_1) \cdot R_{t_1}}{v_{t_1}''} \right]. \quad (\text{I2})$$

Используя в уравнениях (I), (6), (7) и (I2) приведенные закономерности, можем выписать уравнение (5) в окончательной форме:

$$K_t = \frac{\Delta n f \cdot 23,2 \cdot \eta}{10^4 \cdot \left\{ C_b \cdot (t_2 - t_1) + \frac{r_{t_2}}{273,15 \cdot d_b} \cdot \left[\frac{273,15 + t_2}{v_{t_2}''} - \frac{(273,15 + t_1) R_{t_1}}{v_{t_1}''} \right] \right\}}. \quad (\text{I3})$$

Выражая η в процентах и принимая удельную теплоемкость воздуха равной $C_b = 0,24$ кал/г, удельный вес воздуха $d_b = 1,29$ г/л, релятивную влажность $R_{t_1} = 80\%$ и коэффициент $\Delta n f = 3400$ кал/л, можем определить цифровые значения коэффициента K_t . В зависимости от температуры воздуха перед аэротенком (t_1) и при выходе воздуха из аэрационной камеры (t_2), в таблице 2 приведены данные коэффициента K_t .

Из таблицы 2 видно, что при низкой температуре в аэротенке ($t_2 = +10$ °C) коэффициенты K_t имеют высокое значение, что обеспечивает повышение температуры по сравнению с поступающими в аэротенк сточными водами. Обеспечение $K_t > 1$ в интервале термофильной очистки сточных вод ($t_2 = +45 - +70$ °C) можно осуществлять только аэрационными установками, позволяющими использовать выше 10% кислорода воздуха, то есть с кавитационными и турбинными аэраторами.

Вычисление цифрового значения K_t дает возможность оценивать потенциал самонагревания ($\Pi_{\text{сн}}$) в аэротенке, работающем при различных температурных режимах. Подставив в уравнение (4) значение $Q_b + Q_{\text{усн}}$ из уравнения (5) получаем

$$\Pi_{\text{сн}} = Q_{\mu} \left(1 - \frac{1}{K_t} \right). \quad (\text{I4})$$

Выражая Q_{μ} из уравнения (I) получаем

$$\Pi_{\text{сн}} = \Delta n f \cdot \Delta \text{БПК}_{\text{полн}} \cdot (1 - Y) \cdot \left(1 - \frac{1}{K_t} \right). \quad (\text{I5})$$

Т а б л и ц а 2

Зависимость коэффициента термодинамической эффективности аэрационной системы K_t от степени использования кислорода воздуха и температурного режима аэротенка

№ п. п.	Температура воздуха перед аэрационной камерой (t_1) и при выходе из аэрационной камеры (t_2) °C	Коэффициенты K_t					
		Степень использования кислорода воздуха					
		$\eta = 5\%$	$\eta = 10\%$	$\eta = 15\%$	$\eta = 20\%$	$\eta = 25\%$	$\eta = 50\%$
I.	$t_1 = 0^\circ, t_2 = +10^\circ$ C	7,75	15,5	23,25	31,00	38,75	77,5
2.	$t_1 = +20^\circ,$ $t_2 = +45^\circ$	I, I9	2,38	3,56	4,75	5,94	11,88
3.	$t_1 = 0^\circ, t_2 = +45^\circ$	>I	I,84	2,76	3,68	4,60	9,20
4.	$t_1 = +20^\circ,$ $t_2 = +50^\circ$	>I	I,79	2,69	3,58	4,48	8,96
5.	$t_1 = -20^\circ,$ $t_2 = +45^\circ$	>I	I,60	2,40	3,19	3,99	7,98
6.	$t_1 = 0^\circ, t_2 = +50^\circ$	>I	I,47	2,21	2,94	3,68	7,35
7.	$t_1 = +20^\circ,$ $t_2 = +55^\circ$	>I	I,38	2,08	2,77	3,46	6,93
8.	$t_1 = -20^\circ,$ $t_2 = +50^\circ$	>I	I,31	I,97	2,62	3,28	6,56
9.	$t_1 = 0^\circ, t_2 = +55^\circ$	>I	I,18	I,78	2,37	2,96	5,93
10.	$t_1 = +20^\circ,$ $t_2 = +60^\circ$	>I	I,09	I,63	2,18	2,72	5,44
11.	$t_1 = -20^\circ,$ $t_2 = +55^\circ$	>I	I,08	I,62	2,16	2,70	5,40
12.	$t_1 = 0^\circ, t_2 = +60^\circ$	>I	>I	I,44	I,92	2,40	4,81
13.	$t_1 = -20^\circ,$ $t_2 = +60^\circ$	>I	>I	I,34	I,78	2,23	4,45
14.	$t_1 = +20^\circ,$ $t_2 = +65^\circ$	>I	>I	I,30	I,73	2,16	4,33
15.	$t_1 = 0^\circ, t_2 = +65^\circ$	>I	>I	I,18	I,57	I,96	3,92
16.	$t_1 = -20^\circ,$ $t_2 = +65^\circ$	>I	>I	I,10	I,47	I,84	3,68
17.	$t_1 = +20^\circ,$ $t_2 = +70^\circ$	>I	>I	I,04	I,39	I,74	3,48
18.	$t_1 = 0^\circ, t_2 = +70^\circ$	>I	>I	>I	I,28	I,60	3,21
19.	$t_1 = -20^\circ,$ $t_2 = +70^\circ$	>I	>I	>I	I,22	I,52	3,05

Таблица 3

Потенциальное аккумулирование тепловой энергии в аэротенках в зависимости от коэффициента K_t и БПК_{полн} сточной воды (снижение загрязненности 90 %, экономический коэффициент роста микроорганизмов ($Y = 0,3$))

Значение коэффициента K_t	Потенциал самонагрева ккал/л								
	БПК _{полн} очищаемой сточной воды (мгО ₂ /л)								
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
1,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19
1,2	0,36	0,71	1,07	1,43	1,78	2,14	2,50	2,86	3,21
1,4	0,61	1,22	1,84	2,45	3,06	3,67	4,28	4,90	5,51
1,6	0,80	1,61	2,41	3,21	4,02	4,82	5,62	6,43	7,23
1,8	0,95	1,90	2,86	3,81	4,76	5,71	6,66	7,62	8,57
2,0	1,07	2,14	3,21	4,28	5,36	6,43	7,50	8,57	9,64
3,0	1,43	2,86	4,28	5,71	7,14	8,57	10,00	11,42	12,85
4,0	1,61	3,21	4,82	6,43	8,03	9,64	11,24	12,85	14,46
5,0	1,71	3,43	5,14	6,85	8,57	10,28	12,00	13,71	15,42
6,0	1,78	3,57	5,35	7,14	8,92	10,71	12,49	14,28	16,06
7,0	1,84	3,67	5,51	7,34	9,18	11,02	12,85	14,69	16,52
8,0	1,87	3,75	5,62	7,50	9,37	11,24	13,12	14,99	16,87
9,0	1,90	3,81	5,71	7,62	9,52	11,42	13,33	15,23	17,14
10,0	1,93	3,86	5,78	7,71	9,64	11,57	13,49	15,42	17,35

При снижении в аэротенке БПК_{полн} на 90 % и при $Y = 0,3$ уравнение (15) принимает вид:

$$P_{\text{сн}} = \Delta H f \cdot \text{БПК}_{\text{полн}} \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot \left(1 - \frac{1}{K_t}\right). \quad (16)$$

В таблице 3 приведены потенциалы самонагрева в ккал/л согласно уравнению (16) при различных нагрузках сточных вод и в зависимости от коэффициента K_t .

Учитывая пропорциональную зависимость $P_{\text{сн}}$ от БПК_{полн}, можем сказать, что при увеличении БПК_{полн} в n раз, увеличивается и $P_{\text{сн}}$ в n раз.

Использованием приведенных закономерностей в инженерных расчетах можно улучшить конструктивные решения очистных сооружений и технологию очистки высоконагруженных сточных вод.

Л и т е р а т у р а

1. K a m b u h u, K., Andrews, J.F. Aerobic thermophilic process for the biological treatment of wastes. - J. Water Poll. Control Fed., 1969, 41, N 5, Part 2, R 127-R 141.
2. W e s t e r s, H., P r a t t, K.M. Rational design of hatcheries for intensive salmonid culture, based on metabolic characteristics. - Progr. Fish-Cult., 1977, 39, N 4, pp. 157-165.
3. A d a m s, C.E. Jr., E c k e n f e l d e r, W.W. Jr. Nitrification design approach for high strength ammonia waste-waters. - J. Water Poll. Control Fed., 1977, 49, N 3, pp. 413-421.
4. P ö r e l, F., O h n m a c h t, Ch. Thermophilic bacterial oxidation of highly concentrated substrates. - Water Res., 1972, 6, N 7, pp. 807-815.
5. М и н к е в и ч И.Г., Е р о ш и н В.К. К вопросу о расходе кислорода и тепловыделении при росте микроорганизмов. Изв. АН СССР. Сер. биол., 1973, № 3, 414-415.
6. C o o n e y, C.L., W a n g, D.I.C., M a t e l e s, R.I. Measurement of heat evolution and correlation with oxygen consumption during microbial growth. - Biotechnol. Bioeng., 1969, 11, N.3, pp. 269-281.
7. S c h a l l, H. Sr., S c h a l l, H. Jr. Nahrungsmittel-Tabelle. 19. Überarbeitete Auflage. Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1967.
8. Химический состав пищевых продуктов. М., Пищевая промышленность, 1976.
9. А ш м а р и н И.П., М о л ь б е р г А.А., С а д и к о в а Н.В., С ы т и н с к и й И.А. Химия белка. Ч. I. Общая химия белка. Изд-во Ленинградского университета, 1968.
10. В у к а л о в и ч М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Таблицы и диаграмма. М., Машиностроение, 1967.

Heat Evolution in Biological Oxidation
of Wastewaters

Summary

The present article deals with the problem of heat production by microbiological oxidation of wastewaters. A method for the estimation of the potential accumulation of heat energy in aerotanks has been proposed.

In order to estimate the autoheating in wastewaters the coefficient K_t - the thermodynamical efficiency of aeration system - has been deduced.

$$\frac{dQ}{dt} = u \frac{dS}{dt} + v \frac{dO_2}{dt} + w \frac{dO_2}{dt} + \dots + K_t \frac{dQ}{dt} - \dots$$

$$= f(x, y, z, t)$$

- K_t - коэффициент теплоотдачи, $[cal^2/c^2]$.
- S - концентрация ивовой, $[g/l]$.
- u, v, w - компоненты вектора скорости по осям x, y, z $[cm/s]$.
- \dots - координаты точки наблюдения.
- f - функция автонагрева от времени $[cal/s]$.

Практические указания

$$\frac{dQ}{dt} = \dots$$

А.А. Ляэне, Х.Х. Ляхмуссаар

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ОСРЕДНЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
НЕФТЕПРОДУКТОВ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

Целью исследования Балтийского моря является выяснение антропогенного влияния на морскую экосистему в отдельных районах и во всем море и решение практических проблем, связанных с защитой морской среды на основе полученных результатов. В связи с этим большое практическое значение приобрели проблемы переноса загрязняющих веществ в морской среде, а также трансформация и круговорот их в морской экосистеме. Для математического описания этих проблем разработан ряд моделей, основой которых является полуэмпирическая теория турбулентного переноса. Для неконсервативных примесей решается уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} + \kappa S - \mu_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \\ - \mu_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} - \mu_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = f(x, y, z, t), \end{aligned} \quad (I)$$

где μ_x, μ_y, μ_z — коэффициенты турбулентной диффузии, $[\text{см}^2/\text{с}^2]$;

S — концентрация примеси, $[\text{мг}/\text{л}]$;

u, v, w — компоненты вектора скорости по осям x, y, z $[\text{см}/\text{с}]$;

κ — коэффициент неконсервативности $[\text{л}/\text{т}]$;

f — функция источников загрязнения $[\text{мг}/\text{л с}]$.

Граничные условия записываются

$$\frac{\partial S}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0, \quad (2)$$

где n — нормаль к контуру Γ .

Уравнение (I) описывает процесс турбулентной диффузии при определенном поле концентрации, так как в уравнении фигурируют компоненты скоростей в виде множителей у част-

ных производных концентраций. Обычно добавляются уравнения для определения полей скоростей, солености и температуры с соответствующими граничными условиями и полученная система дифференциальных уравнений решается численным методом.

В данной статье рассматривается только применение уравнения осредненной по пространству концентрации примеси при практических расчетах.

Для исследования уравнения (I) с граничными условиями (2) можно разделить его на две части [I]:

$$\left. \begin{aligned} S &= \bar{S}(t) + S^*(x, y, z, t) \\ f &= \bar{f}(t) + f^*(x, y, z, t) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $\bar{S}(t)$ и $\bar{f}(t)$ — являются соответственно осредненными по пространству концентрация и функция нагрузки, а

$S^*(x, y, z, t)$ и $f^*(x, y, z, t)$ — являются соответственно разностями между мгновенной и осредненной по пространству концентрацией и нагрузкой.

Подставляя формулу (3) в уравнение (I) и разделяя полученное уравнение на две части, получаем уравнение для осредненной концентрации:

$$\frac{d\bar{S}}{dt} + \kappa\bar{S} = \bar{f}(t) \quad (4)$$

с начальным условием:

$$t = 0 \quad \bar{S} = \bar{S}_0 = 0 \quad (5)$$

и уравнение для отклонения от среднего:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S^*}{\partial t} + u \frac{\partial S^*}{\partial x} + v \frac{\partial S^*}{\partial y} + w \frac{\partial S^*}{\partial z} + \kappa S^* - \\ - \mu_x \frac{\partial^2 S^*}{\partial x^2} - \mu_y \frac{\partial^2 S^*}{\partial y^2} - \mu_z \frac{\partial^2 S^*}{\partial z^2} = f^*(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (6)$$

с граничным условием

$$\frac{\partial S^*}{\partial n} \Big|_r = 0. \quad (7)$$

Действительная концентрация получается по формуле (3). Решение задачи (4)–(5) является довольно приближительной ха-

рактеристикой, но все-таки позволяет оценивать правильность исходных данных и общей тенденции изменения загрязнения в водной среде в зависимости от изменения нагрузки. Задача легко решается аналитически

$$S = S_0 e^{-kt} + e^{-kt} \int_0^t f(t) e^{kt} dt. \quad (8)$$

Задача (6)-(7) обычно решается численным методом.

В данной статье рассматривается уравнение (4) с начальными условиями (5) для исследования изменения концентрации нефтепродуктов в Балтийском море на длительные сроки.

Уравнением (4) описывается скорость разложения примеси соответствующей мономолекулярной реакции. Применение кинетики мономолекулярной реакции ограничено следующими условиями:

- 1) реакция является необратимой;
- 2) постоянная скорости реакции и порядок реакции должны оставаться постоянными в течение реакции;
- 3) скорость реакции не зависит от начальной концентрации ингредиента.

Время полураспада вещества в мономолекулярной реакции рассчитывается из следующей формулы:

$$T = \frac{2,303}{k} \lg 2 = \frac{0,693}{k}, \quad (9)$$

где T - время полураспада.

Для мономолекулярной реакции время полураспада T является также постоянной величиной.

Уравнение мономолекулярной реакции достаточно точно описывает скорость разложения некоторых молекул, а также радиоактивное разложение атомных ядер. Однако применение этого уравнения для описания сложных процессов разложения загрязняющих веществ в морской среде при некоторых гипотезах оказывается просто удобным. Заметим при этом, что величина k теряет свой первоначальный физический смысл и является сложной функцией от различных характеристик процесса. Поэтому константа скорости распада нефтепродуктов k , определенная в лабораторных условиях, не применима для расчета этого процесса в морской среде, где распределение и разрушение разлитой нефти является чрезвычайно сложным про-

цессом и состоит более чем из 15 элементарных процессов [2]. Из уравнений (4)–(5) можно рассчитать константу скорости разложения нефтепродуктов в морской среде в случае, если имеются данные об изменении осредненной концентрации исследуемого ингредиента и функция нагрузки того же ингредиента за определенный промежуток времени. Предполагаем, что в начале века концентрация и нагрузка нефтепродуктов в Балтийском море была равна нулю. По Карлбергу [3] количество нефтепродуктов, попавшее в Балтийское море в 1975 году, равно 80 000 т, что соответствует функции нагрузки $f(75) = 0,004$ мг/л год, а осредненная концентрация 0,025 мг/л [4]. Для определения константы скорости разложения рассмотрим два случая.

1. Функция нагрузки $\bar{f}(t)$ линейно увеличивалась в период от 1900 до 1975 года от нуля до 0,004 мг/л год

$$\bar{f}(t) = Mt, \quad (10)$$

где $M = 5,33 \cdot 10^{-5}$ мг/л год.

Подставляя (10) в формулу (8), получим:

$$S = \frac{M}{k}t + \frac{M}{k^2}(1 - e^{-kt}). \quad (11)$$

Откуда $k_1 = 0,1667$ год⁻¹ и $T_1 = 4,16$ год.

2. Функция нагрузки $\bar{f}(t)$ изменяется пропорционально мировой добыче нефти в период от 1900 до 1969 года. Данные приведены в табл. I [2].

Т а б л и ц а I

Мировая добыча нефтепродуктов

Год	1900	1938	1955	1969
R [10 ⁶ т]	20	271	870	2145

Эту таблицу можно аппроксимировать функцией

$$R = Ge^{\gamma t}, \quad (12)$$

где $G = 20 \cdot 10^6$ т $\gamma = 0,0687$ год⁻¹
 $t = 0$ соответствует 1900 году.

Функция нагрузки для Балтийского моря в таком случае имеет вид:

$$\bar{f}(t) = Be^{\beta t}, \quad (13)$$

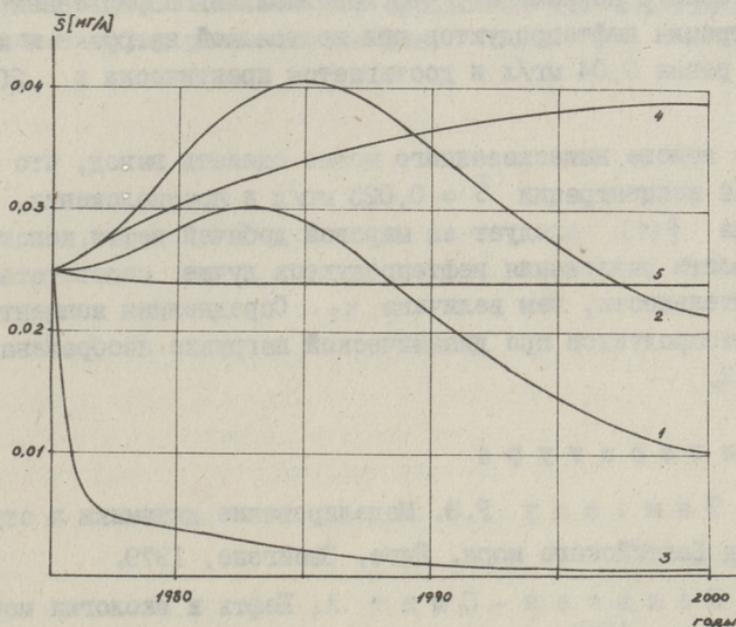
где $\beta = \gamma = 0,0667 \text{ год}^{-1}$ и $B = 537 \text{ т}$.

При таких исходных данных $\kappa_2 = 0,1 \text{ год}^{-1}$ и $T_2 = 6,93 \text{ год}$.

Полученные константы скорости разложения нефтепродуктов позволяют прогнозировать изменение осредненной концентрации нефтепродуктов в Балтийском море, если имеются данные об изменении нагрузки. Предположим, во-первых, что нагрузка моря нефтепродуктами не изменится до 2000 года, а во-вторых, нагрузка изменяется соответственно данным в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
Изменение нагрузки Балтийского моря до 2000 года

Год	1976	1980	1985	1990	2000
R [т]	$80 \cdot 10^3$	$112 \cdot 10^3$	$72 \cdot 10^3$	$34 \cdot 10^3$	$22 \cdot 10^3$



Фиг. 1. Изменение осредненной концентрации нефтепродуктов в Балтийском море при разных скоростях разложения и нагрузки.

Кривые 1, 2, 3 — переменная нагрузка, равна соответственно:
 $\kappa_1 = 0,1667 \text{ г}^{-1}$; $\kappa_2 = 0,1 \text{ г}^{-1}$; $\kappa_3 = 1,35 \text{ г}^{-1}$.

Кривые 4, 5 — постоянная нагрузка κ , равна соответственно:
 $\kappa_2 = 0,1 \text{ г}^{-1}$; $\kappa_1 = 0,1667 \text{ г}^{-1}$.

Результаты прогноза приведены на фиг. 1. Из графика видно, что использование константы k , полученной в лабораторных условиях не дает реальных результатов. Несмотря на повышение нагрузки осредненная концентрация резко падает. Полученные результаты не соответствуют реальности.

При постоянной нагрузке (кривые 4 и 5) осредненная концентрация приближается асимметрически к постоянной, которая определяет состояние равновесия между процессами разложения и прибавления.

Кривая 5 приближается к асимптоте сверху, это значит, что максимальная нагрузка на море была до 1975 года, что также не соответствует реальным условиям нагрузки. Отсюда следует, что величина скорости распада k_1 превышает действительную скорость разложения нефтепродуктов в морской среде.

Кривая 4 показывает, что максимальная осредненная концентрация нефтепродуктов при постоянной нагрузке и константе равна 0,04 мг/л и достигается практически к 2000 году.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что при исходной концентрации $\bar{S} = 0,025$ мг/л и предположении, что нагрузка $\bar{f}(t)$ следует за мировой добычей нефти, константа скорости разложения нефтепродуктов лучше соответствует действительности, чем величина k_2 . Осредненная концентрация нефтепродуктов при динамической нагрузке изображена на кривой 2.

Л и т е р а т у р а

1. Тамсалу Р.Э. Моделирование динамики и структуры вод Балтийского моря. Рига, Звайгзне, 1979.

2. Нельсон - Смит А. Нефть и экология моря. М., Прогресс, 1977.

3. Карлберг С.Р. О нефтяных загрязнениях Балтийского моря. 2-й Советско-Шведский симпозиум по загрязнению Балтийского моря. Рига 17-24 сент. 1973 г.

4. Carlberg, R. A five year study of the occurrence of non-polar hydrocarbons (oil) in Baltic waters 1970-1975. - Rapp. P.-V. Reun. Cons. int. Explor. Mer, 171; 67-69, 1977.

A. Lääne, H. Lyhmussaar

The Prognosis on the Mean Concentrations of Oil
Products in the Baltic Sea

Summary

The monomolecular reaction equation is used for forecasting changes in the mean concentrations of oil products in the Baltic Sea Area. The constants determined under laboratory conditions are not applicable for describing the processes taking place in the sea.

УТИЛИЗАЦИЯ И ДООЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД
КАРТОФЕЛЕКРАХМАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Еще в 1973 году большинство картофелекрахмальных предприятий СССР не имели очистных сооружений и стоки спускались неочищенными в водоемы. В 1976 году в промышленности РСФСР использовалась только 1/3 отходов, а сухие вещества, содержащиеся в клеточном соке картофеля, вообще не использовались [1]. При этом сухие вещества вторичных продуктов составляли до 40 % сухого вещества картофеля (мезга около 20 % и клеточный сок около 20 %). Народное хозяйство теряло при переработке картофеля больше 100 тыс. т сухих веществ в год. К убыткам в связи с потерей кормового белка следует добавить затраты на обработку трудно поддающихся очистке сточных вод, которые образуются от неиспользованного вторичного продукта — клеточного сока картофеля.

Нами исследована возможность утилизации и доочистки стоков при производстве картофельного крахмала. По результатам исследований разработана и внедрена технология утилизации и доочистки стоков, проверенная на практике опытного цеха в течение трех сезонов 1976–1978 гг.

Основными задачами исследований являлось:

1. Разработать и внедрить в производство оптимальную технологическую схему утилизации вторичных продуктов картофелекрахмального производства в качестве корма с учетом интересов охраны окружающей среды.

2. Разработать качественные и количественные показатели технологических вод и дать методические указания для проектирования технологической схемы картофелекрахмальной промышленности с комплексной утилизацией вторичных продуктов и биологической доочисткой сточных вод.

При промышленной переработке картофеля с клеточным соком теряется около 20 % сухого вещества сырья. Такого высокого процента потерь сырья нет ни в одной отрасли пищевой промышленности. Кроме потерь сырья требуются значительные затраты на очистку образующихся стоков.

В картофелекрахмальной промышленности для уменьшения загрязнения стоков прежде всего следует усовершенствовать технологические процессы с целью максимального использования сухого вещества картофеля. Это значительно снизит загрязненность сточных вод, поскольку сами технологические процессы выделения клеточного сока являются эффективным средством очистки сточных вод от органического загрязнения. Технология производства крахмала и очистки стоков представляет собой одно неразделимое целое.

Сравнение показателей сбрасываемых стоков до (1971-1972 и 1975-1976 годы) и после (1976-1978 гг.) внедрения утилизации представлено в таблице I. Эффективность очистки сточных вод по БПК₅ только одноступенчатым центрифугированием кашки составляет около 60 %, при двухступенчатом центрифугировании кашки примерно 80 %.

Так как биологическая очистка стоков без выделения и утилизации клеточного сока картофеля нерентабельна и технически сложна, то технологический подход к очистке является реальным средством уменьшения загрязнения промышленных стоков.

Для выделения клеточного сока из кашки используется центрифугирование. Полученный клеточный сок используют без концентрирования или с последующими коагуляцией и выпариванием клеточного сока. Для оптимизации процесса ставится его математическая модель и затем решается задача оптимизации.

По исследованиям оптимизации можно сделать вывод, что при комплексном решении проблемы, учитывая технологические, сельскохозяйственные и водохозяйственные нужды, надо центрифугировать кашки (при одноступенчатом центрифугировании) технологически оптимальным разбавлением $\gamma = 1,4 \text{ м}^3/\text{т}$. Такой режим требует коагулирования белков и концентрирования скоагулированного клеточного сока. Степень очистки стоков при этом до 85 % по БПК.

Т а б л и ц а I

Расход и загрязнение стоков в опытном цехе до
и после утилизации (среднегодовые данные)

Показатель	До внедрения утилизации	После внедрения утилизации
I	2	3
Расход вытекающих из отстойников стоков:		
м ³ /сутки	1290	717
м ³ /смену	430	239
Удельный расход стоков м ³ /т	32,5	18
Загрязнение вытекающих из отстойников стоков:		
ХПК, мг O ₂ /л	1918	1298
БПК ₂₀ , мг O ₂ /л	1763	1190
БПК ₅ , мг O ₂ /л	1336	862
Суточный объем загрязнений по БПК ₅		
кг O ₂ /сутки	1723	618
чел.-экв.	31915	11444
Удельное загрязнение по БПК ₅		
кг O ₂ /т	43	15,5
чел.-экв./т	800	290
Расход соковых вод: м ³ /сутки	444	324
м ³ /смену	148	108
Загрязнение соковых вод:		
ХПК, мг O ₂ /л	4779	2540
БПК ₂₀ , мг O ₂ /л	4044	1896
БПК ₅ , мг O ₂ /л	3334	1135
Суточный объем загрязнений от соковых вод по БПК ₅		
кг O ₂ /сутки	1480	367
чел.-экв.	27413	6796
Удельное загрязнение по БПК ₅		
кг O ₂ /т	37	9
чел.-экв./т	665	167
Загрязнение от промывки картофеля по БПК ₅		
кг O ₂ /сутки	243	251

I	2	3
кг O_2 /т	6,07	6,27
чел.-экв./т	II2	II6
Загрязнение от промывки картофеля по БПК ₅ - доля от общих загрязнений, %	14	40

Критерии эффективности центрифугирования хорошо согласуются с действительностью. Эффективность центрифугирования изменяется за счет выбора коэффициента разбавления кашки. При комплексном решении проблемы, учитывая технологические, сельскохозяйственные и водохозяйственные нужды, надо центрифугировать с максимальным технологически возможным разбавлением кашки. Двухступенчатое центрифугирование значительно эффективнее одноступенчатого, эффективность повышается до 12 % (учитывая оптимизированный режим одноступенчатого центрифугирования). Это и является основным результатом оптимизации центрифугирования кашки.

Проведенные исследования по оптимизации центрифугирования позволяют сделать следующие выводы.

Одноступенчатым выделением клеточного сока можно удалить до 75–80 % клеточного сока. Двухступенчатое выделение более эффективно, так как повышается выделение клеточного сока – 92–94 %. С учетом последующей утилизации целесообразно выделять клеточный сок по схеме двухступенчатого центрифугирования с возвратом сока со II ступени в качестве разбавляющей жидкости на I ступень центрифугирования. При том потери крахмала и мезги с клеточным соком незначительны.

Выделение клеточного сока оказывает решающее значение на уменьшение загрязненности сточных вод, причем чем больше выделяется клеточный сок, тем выше качество промстоков и существенно уменьшаются затраты на их очистку.

Оптимизация процессов выделения клеточного сока показала рентабельность его с концентрацией сухих веществ в пределах 3 %.

По производственным опытам простым и эффективным способом использования клеточного сока и мезги является перемещение сока с обезвоженной мезгой и последующая термиче-

ская обработка острым паром. Кормовая ценность полученного корма с содержанием сухого вещества около 5% — 12–20 кг жидкого корма в одной кормовой единице.

В Эстонской ССР при годовой мощности крахмальных заводов около 85 000 т год, существующие крахмальные заводы могут при одноступенчатом центрифугировании дать сельскому хозяйству 5070 тыс. кормовых единиц, при двухступенчатом центрифугировании — 8708 тыс. кормовых единиц.

Опыты показали, что белки картофеля играют большую роль в рационе питания. При производстве крахмала из картофеля извлекается небелковая часть, так как белки остаются в основном в клеточном соке и частично в мезге.

Аминокислотный состав белков клеточного сока и мезги (табл. 2) определяли в институте животноводства и ветеринарии Эстонской ССР. Из данных таблицы 2 видно, что в картофельном белке больше всего лизина, которого (как и метионина и триптофана) в кормах часто не хватает.

По нашим исследованиям и производственным опытам в течение двух сезонов считаем наиболее реальным способом использования клеточного сока его перемешивание с обезвоженной мезгой и термическую обработку смеси. Жидкая кормовая смесь с концентрацией 5–10% сухого вещества является ценным кормом.

В качестве примера представляем состав корма из побочных продуктов картофелекрахмального производства. Состав корма определен и опытное кормление животных произведено совместно с Трудового Красного Знамени Научно-исследовательским институтом животноводства и ветеринарии Эстонской ССР.

Для средних предприятий, мощностью 40–100 т картофеля в сутки, самый простой способ использования клеточного сока после центрифугирования в смеси обезвоженной мезгой.

При мощности крахмального завода 40 т картофеля в сутки утилизационный цех может при одноступенчатом центрифугировании выпускать около 70 т жидкого корма, т.е. 4500 кормовых единиц. Стоимость такого корма — 2 руб/т, т.е. 4,3 коп/корм.ед. (средняя стоимость I корм. ед. в колхозах

Эстонской ССР 1975 г. была 8 коп.). В производственный сезон 1976/77 гг. было получено из опытного утилизационного цеха 5060 т такого корма, всего 234 тыс. кормовых единиц.

Т а б л и ц а 2

Аминокислотный состав белков соковых вод и мезги

Аминокислоты	Содержание аминокислот, г/кг сухих веществ	
	в мезге	в клеточном соке
Незаменимые		
лизин	2,1	16,8
триптофан	0,6	-
метионин	-	2,0
треонин	0,5	7,4
валин	1,1	12,7
изолейцин	1,0	8,0
лейцин	1,2	11,4
фенилаланин	1,3	10,0
гистидин	0,4	12,7
аргинин	0,6	6,0
Заменимые		
аспаргиновая кислота	5,4	83,7
серин	1,2	10,0
глутаминовая кислота	2,9	40,0
пролин	-	9,4
глицин	1,5	8,7
аланин	1,0	13,4

При существующей сети крахмальных заводов возможно одноступенчатым центрифугированием кашки получить 5070 тыс. кормовых единиц, при двухступенчатом центрифугировании - 8708 тыс. кормовых единиц, а после реорганизации производства - 12264 тыс. кормовых единиц в году, что в два раза больше, чем при одноступенчатом центрифугировании. Сейчас такое количество корма отводится в водоемы или лишь частично нерационально используется.

В Эстонской ССР было в 1976 г. израсходовано для производства 1 кг свинины 5,58 кормовых единиц и для получения 1 литра молока 1,06 кормовых единиц. Следовательно, при внедрении утилизации и реорганизации крахмального производства

от использования дополнительного корма можно получить в Эстонской ССР приведенные в таблице 4 количества сельскохозяйственной продукции.

Т а б л и ц а 3

Состав корма из утилизационного цеха термически обработанной смеси клеточного сока и обезвоженной мезги

Показатель	Един. изм.	В корме	В сухом веществе
Сухое вещество	%	4,94	
Зола	%	0,52	10,53
Сырой протеин	%	1,18	23,89
Сырое волокно	%	0,43	8,70
Безазотистые экстрактивные вещества	%	2,81	56,88
Фосфор	г/кг	0,25	5,06
Кальций	г/кг	0,19	3,85

Коэффициенты переваривания: протеин - 0,60; волокно - 0,29; безазотистые экстр. вещества - 0,85.

1 кормовая единица равняется 19,9 кг корма.

В кормовой единице 140 г перевариваемого протеина.

Т а б л и ц а 4

Количество сельскохозяйственной продукции, которое может быть произведено утилизированными кормами в Эстонской ССР

Показатели	Мл. кормовых единиц	С дополнительным кормом можно получить в год т молока или т свинины	
1. При одноступенчатом центрифугировании	5,07	4783	909
2. При двухступенчатом центрифугировании	8,71	8215	1560
3. При двухступенчатом центрифугировании и после реконструкции производства крахмала	12,26	11570	2198

Средняя себестоимость утилизированной кормовой единицы - 5,3 коп., что ниже себестоимости в колхозах ЭССР в 1975 г. (8 коп.)

Опытное кормление животных полученным кормом было проведено в трех хозяйствах республики. Результаты были хорошими.

Используя полученные результаты для ориентировочной оценки возможного эффекта от реорганизации крахмального производства при утилизации стоков в масштабе Советского Союза приведено в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

Ориентировочная оценка эффективности утилизации при годовой мощности I 800 000 т картофеля в год

Показатель	Удельный расход на I т карт./год		Затраты	
	по кап. влож. руб.	по экспл. руб.	по кап. влож. млн. руб.	по экспл. плуат. млн. руб./год
1. Глубокая очистка стоков	391,0	-	703,8	-
2. Полная очистка стоков	174,12	41,7	313,4	75,1
3. Утилизация побочных продуктов с одноступенчатым центрифугированием и полной очисткой стоков	93,41	26,6	168,14	47,9
4. То же - с двухступенчатым центрифугированием	68,47	15,0	123,2	27,0
5. То же - с реорганизацией производства крахмала, учитывая потребности комплексной утилизации и очистки стоков	35,83	8,9	64,5	16,0

Из таблицы вытекает экономически важная роль утилизации. Широкому внедрению выделения клеточного сока и утилизации препятствует отсутствие центрифуг.

Установлен и ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии утилизации отходов. При утилизации клеточного сока и мезги на заводе мощностью 50 т картофеля в сутки очистные сооружения сточных вод обойдутся на I, I млн. рублей дешевле и в год будет произведено корма ценностью около 700 тыс. кормовых единиц.

Выгодность утилизации побочных продуктов при производстве картофельного крахмала – клеточного сока и мезги от-крывается в четырех аспектах: в технологии производства кар-тофельного крахмала, в водном хозяйстве при очистке стоков, возможностью получения дополнительного корма от продуктов утилизации для сельского хозяйства и в защите окружающей среды. Прямыми расчетами можно оценивать только эффектив-ность трех первых показателей: для оценки эффективности за-щиты окружающей среды нет методики. Это можно оценить толь-ко по уменьшению расходов воды и загрязнения на единицу сырья и по степени использования сырья. Экономичность тех-нологии утилизации оценивается не только стоимостью или ценностью полученного продукта, а комплексной стоимостью мероприятия по очистке и ценностью полученного корма.

Экономичной считается утилизация тогда, когда затраты на утилизацию и очистку остаточного загрязнения меньше, чем стоимость очистки стоков без всякой утилизации. Разность этих сумм показывает эффективность выбранной технологии утилизации.

По существу, расчеты только по очистке сточных вод яв-ляются формальными, поскольку сезонность работы картофе-лекрахмальных заводов и высокая концентрация стоков, которые содержат биологически трудно разлагаемые компоненты, не обеспечат нормальную и эффективную работу очистных сооруже-ний.

Как составная часть комплекса мероприятий по утилиза-ции и очистке стоков картофелекрахмального завода была ис-следована доочистка сточных вод предприятия в аэрируемых биологических прудах после выделения из кашки и утилизации клеточного сока картофеля. Результаты очистки приведены в таблице 6.

Аэрирование воды в прудах происходило с помощью пла-вающих кавитационных аэраторов КА-60 (глубина погружения 60 см), которые были установлены как стационарно, так и са-моперемещающимися по воде по схемам "карусель" и "маят-ник".

Движение аэраторов увеличивает эффективность аэрации, так как аэратор постоянно приходит в контакт с новыми вод-ными массами.

Т а б л и ц а 6

Средние результаты доочистки стоков картофелькрахмального завода в аэрируемых биологических прудах (расход $96 \text{ м}^3/\text{сут}$, при нормальной нагрузке прудов)

Показатель	Температура, °С	Содерж. кислор., мг/л	pH	XПК $\text{мгO}_2/\text{л}$	БПК ₅ $\text{мгO}_2/\text{л}$	БПК ₂₀ $\text{мгO}_2/\text{л}$
Поступающие в I пруд стоки	10,4	0	7,0	1425	655	1260
Поступающие во II пруд стоки	9,0	7,0	7,9	270	112	199
Вытекающие из II пруда стоки	8,7	6,5	8,1	163	41	107
Эффективность очистки, %	-	-	-	88	94	92

Опыт зимней эксплуатации показал, что в случае пенящей сточной жидкости аэраторы могут работать только в стационарном режиме, ибо замерзшая пена закрывает полны, по которым аэраторы перемешиваются.

Основные результаты исследования заключаются в следующем.

1. Разработаны и внедрены в производство эффективные режимы одно- и двухступенчатого центрифугирования кашки со степенью выделения свободного клеточного сока до 94 %. Доказано явное преимущество двухступенчатого центрифугирования кашки перед одноступенчатым.

2. Установлено, что смесь клеточного сока при 3 %-ном содержании сухого вещества и обезвоженной мезги после термической обработки острым паром дает белковый корм с содержанием сухого вещества до 5 %.

3. Исследованы возможности гашения пены отцентрифугирования клеточного сока технологическими методами.

4. Разработана и исследована технология очистки остаточного загрязнения после выделения клеточного сока в аэротенке с доочисткой в аэрируемых биологических прудах. Установлено, что эквивалентное загрязнение стоков крахмального производства без выделения клеточного сока составляет

800 человеко-эквивалентов на тонну картофеля, при выделении же клеточного сока одноступенчатым центрифугированием - 290 человеко-эквивалентов, а при двухступенчатом центрифугировании - 150 человеко-эквивалентов.

5. Путем утилизации клеточного сока картофеля в Эстонской ССР можно сократить капиталовложения на биологические очистки сооружения крахмальных заводов с 14,8 до 5,8 млн. рублей (вместе с утилизацией) и уменьшить ежегодные затраты на их эксплуатацию с 3,6 до 0,5 млн. руб. в год. Доход от продажи производственного корма составляет 980 тыс. рублей в год.

Л и т е р а т у р а

И. Мельников А.В., Ларионова Т.Л., Голуб В.Ф. Крахмалопаточная промышленность РСФСР в десятой пятилетке. Научно-технический реферативный сборник. Крахмалопаточная промышленность (ЦНИИТЭИ пищевпром), М., 1976, с. II-20.

E. Kirt

The Utilization and Secondary Treatment of Sewage at Potato-Starch Manufactures

Summary

The present article deals with the problems of utilization and secondary treatment of sewage at potato-starch manufactures.

The quantitative and qualitative indices of sewage before and after utilization are described. The effectiveness of utilization and secondary treatment have been brought out.

Я.Я. Кару, О.П. Паулус

О РОЛИ РЕГЕНЕРАЦИИ СЕТКИ ПРИ МИКРОФИЛЬТРОВАНИИ
СТОЧНЫХ ВОД

В течение ряда лет в Таллинском политехническом институте проводятся исследования по применению микрофильтров для механической очистки как хозяйственно-бытовых, так и производственных сточных вод [1-3].

Как известно, в процессе микрофильтрации задерживается взвесь, содержащаяся в сточной жидкости. Взвесь образует на сетке пленку, вследствие чего по периметру барабана микрофильтра увеличиваются гидравлическое сопротивление и задерживающая способность фильтра. В начале фильтроцикла пропускная способность микросетки максимальная, степень очистки же минимальная. В ходе фильтроцикла производительность уменьшается, а степень очистки увеличивается. Таким образом, в зависимости от состава сточных вод в конце фильтроцикла иногда пропускная способность микрофильтра может дойти до нуля. Поэтому очень важное значение имеет непрерывная регенерация микрофильтра, чтобы восстановить первоначальное состояние микросетки.

В общем случае средняя скорость фильтрации и эффект очистки микрофильтра определяются в виде функции:

$$(V_k, \varepsilon) = F(C_0; \beta; G; \Delta H; T; P; t^\circ), \quad (I)$$

- где C_0 - количество взвешенных веществ в исходной воде;
 β - характеристика свойств примесей;
 G - характеристика фильтровальной перегородки;
 ΔH - потеря напора в микросетке;
 T - продолжительность фильтроцикла;
 P - степень регенерации микросетки;
 t° - температура воды.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что эффект очистки микрофильтра зависит в основном от плотности микросетки и количества примесей в исходной воде. Производительность микрофильтра во многом зависит от регенерации микросетки. Под регенерацией подразумевается промывка микросетки, целью которой является ее очистка от задержанных примесей. Конструкция промывной системы и режим промывки должны обеспечить полную отмывку загрязнений после каждого оборота барабана микрофильтра, при минимальном расходе промывной воды.

В качестве промывной системы в практике применяются перфорированные или щелевые трубы, а также пластинчатые разбрызгиватели. Предпочтение следует отдавать последним как наиболее надежным.

Эффективность регенерации во многом зависит от напора в промывной системе. Напор воды должен строго соответствовать рабочему режиму микрофильтра. При низком напоре в промывной системе микросетка промывается неполностью, что, в свою очередь, обусловит постепенное увеличение потери напора и снижение пропускной способности микрофильтра.

Т а б л и ц а I

Вид сточных вод	C_0	ε	V_k	Расход промывной воды в % от полезной производительности
	мг/л	%	м/ч	%
Хоз.-бытовые сточ. воды	175-350	52-55	22,0-23,0	6-7
Гидролизная промышленность	100-250	40-50	9,0-14,0	4-8
Шламовые воды	8000-12000	75-90	1,35-2,26	10-20
Шламовые воды после центрифугирования	1200-1600	50-60	4,7	4-12

Некоторые данные по микрофильтрованию сточных вод приведены в таблице I, где указаны начальная концентрация примесей C_0 , эффект очистки ε , средняя скорость фильтрования и удельный расход промывной воды.

Определенное значение приобретают вопросы регенерации микросетки при фильтровании сточных вод, способных обуславливать развитие биологической пленки вокруг нитей микросетки, что со временем приводит к значительному уменьшению пропускной способности микрофильтра. Так, например, при фильтровании сточных вод гидролизной промышленности, несмотря на интенсивную промывку, предотвратить биообращение микросетки только гидравлическим способом, как правило, не удается. Например, с применением сетки № 300 за 22 часа непрерывной работы при небольшом колебании взвеси в поступающей воде производительность уменьшалась от 12,4 до 5,8 м/ч, т.е. более чем в два раза.

Данные, приведенные в таблице I, относятся к первым часам фильтрования, когда зарастания еще не наблюдалось. Интенсивное развитие бактериальной пленки вокруг нитей и на внутренней поверхности сетки вызвано наличием в воде большого количества питательных веществ, обуславливающих интенсивный рост бактерий.

Для борьбы с биообращением микросеток в литературе [4, 5] предложен ряд способов, таких как:

- применение бактерицидной установки;
- выбор материала сетки, который затрудняет прилипание к нитям сетки;
- введение хлора в промывную воду и осуществление постоянной промывки хлорированной водой;
- образование электролитической системы, в которой барабан является анодом. При этом обеспечивается непрерывное удаление пленки за счет выделяющегося кислорода.

Для определения эффективности использования хлора при доочистке гидролизных сточных вод были проведены специальные лабораторные исследования, результаты которых приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, микросетки 004 и № 300 за 3-4 месяца эксплуатации при отсутствии реагентной противобактериальной обработки практически полностью обрастают биологической пленкой.

Опыты свидетельствуют о том, что периодическое хлорирование микросеток с повышенными дозами хлора является на-

дежным средством борьбы против биообрастания. Поскольку хлор применяется практически на всех станциях для обеззараживания очищенных сточных вод перед спуском их в водоем, то для использования хлора в вышеназванных целях не требуются большие капиталовложения.

Т а б л и ц а 2

Результаты определения пропускной способности микросеток с учетом влияния периодического хлорирования

С е т к а	Время нахождения микросетки в потоке сточной воды	Пропускная способность фильтров мл/с		Снижение пропускной способности в результате отсутствия хлорирования, %
		ежедневно обрабатываемых хлором	не обрабатываемых хлором	
04 фосф. бронза	2 месяца	58,0	38,6	34
№ 300 нерж. сталь	2 месяца	12,1	2,5	80
	3 месяца	11,0	1,5	86
	4 месяца	9,8	практически воды не пропускает	100
004 фосф. бронза	2 месяца	12,6	2,8	77
	3 месяца	13,8	2,3	87
	4 месяца	сетка разрушалась под влиянием агрессивности среды		-

Необходимо учесть, что хлорирование является дополнительным источником агрессивности для микросеток и других конструктивных элементов микрофильтров.

Л и т е р а т у р а

1. П а у л у с О.П. Исследование рабочих режимов микрофильтров при предварительной механической очистке сточных вод. Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук, 1971, Таллин.

2. Пааль Л.Л., Паулус О.П., Хейнпа-
лу Ю.Ю. Вопросы очистки шламовых вод торфобрикетных
предприятий. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 348, 1973.

3. Кару Я.Я., Пааль Л.Л., Паулус О.П.
Исследование доочистки сточных вод гидролизного завода
методом микрофилтрования. Материалы VI Всесоюзного сим-
позиума по современным проблемам самоочищения и регулиро-
вания качества воды. IV секция, Таллин, 1979.

4. Патент ФРГ кл. I2I5-0I, № II8905I, заявлено 24.XII.
1960, опубликовано 18.III.1965.

5. V a n d u k e, K.G. Microstraining in water pollu-
tion control.- Effluent and Water Treatment Journal, 11,
N 7, 1971.

J. Karu, O. Paulus

The Importance of Regenerating Net in
Microfiltration of Sewage Water

Summary

The regeneration of microfabric in microfiltration of
sewage water is considered. The results of periodical chlo-
rination of microfabrics with increased doses of chlorine
are described.

Э.О. Лойту, Х.А. Вельнер, А.Э. Саава

ВЫНОС ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ВОДОСБОРА МАЛЫХ
ВОДОТОКОВ

Поступление загрязняющих веществ в водоемы зависит как от природных условий водосбора, так и от характера деятельности человека на нем. Загрязнение водоемов происходит в результате концентрированного сброса сточных вод, либо в результате диффузного поступления загрязнения со всей водосборной площади (поверхностный смыв). Диффузное поступление загрязнений зависит от характеристики водосбора. Поэтому в последние годы все больше внимания привлекает установление существующих связей водоема с его водосборной площадью [1].

Загрязнение водосбора происходит вследствие выпадения загрязняющих веществ из атмосферы, а также при использовании удобрений, ядохимикатов и пестицидов в сельском и лесном хозяйстве. Поступление загрязнений из атмосферы происходит в виде сухих выпадений, либо с атмосферными осадками. При промышленном загрязнении воздуха резко возрастает содержание в осадках тяжелых металлов, серы и пр. Так, например, в районе г. Чикаго (США) за год выбрасывается в атмосферу около 86 000 т железа, 3 500 т цинка, 2 200 т свинца, 44 т мышьяка и 50 т кобальта [2]. В результате этого на территории США содержание тяжелых металлов в атмосферных осадках и поверхностных водах значительное. До сих пор химический состав атмосферных осадков изучен недостаточно. Можно предполагать, что поступление загрязняющих веществ с атмосферными осадками играет немаловажную роль в загрязнении водоемов. В течение 1977-1979 гг. лабораторией сантехники ТПИ проведены исследования за атмосферными осадками. Был определен состав и количество выпавших веществ загрязнения с осадками в пяти пунктах наблюдения недалеко от

промышленного района г. Таллина. При определении нагрузки загрязняющих веществ, поступающих из атмосферы, использовался метод снеговых проб, т.е. содержание загрязнителей определялось в снежном покрове до начала снеготаяния. По этим величинам определялось годовое поступление веществ загрязнения. Образцы снега собирались и оттаивались в пластмассовой посуде с соблюдением всех предосторожностей с тем, чтобы избежать случайного загрязнения пробы. Данные определения ТПИ приведены в табл. I, там же изложены результаты аналогичных исследований, проведенных зарубежными исследователями в бассейне Балтийского региона.

Т а б л и ц а I

Поступление в кг/км².год загрязняющих веществ с атмосферными осадками в бассейне Балтийского моря (по данным разных исследователей)

Загрязняющее вещество	Асплунд [3]	Тьель [4]	Хоуманд [4]	Эйхнер [4]	ТПИ	Средний
1. Свинец	4,5	12,1	8,2	12,0	5,2	8,4
2. Кадмий		0,3	0,2		0,09	0,2
3. Цинк	37,5	20,9	16,0	34,0	10,8	23,8
4. Медь	1,5		1,8		1,6	1,6
5. Никель	0,45		0,70		0,24	0,46
6. Хром	0,15		0,50			0,32
7. Ртуть					0,01	0,01
8. Фосфор					38	-
9. Азот					730	

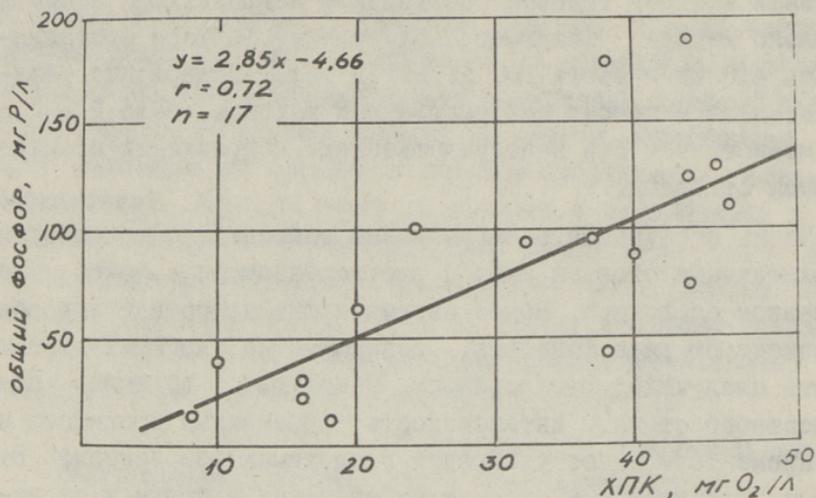
Приведенные в таблице I величины показывают их относительно хорошее совпадение.

Можно считать, что в течение года с атмосферными осадками на 1 кв. км поверхности в Балтийском регионе выпадает в среднем 8,4 кг свинца, 0,2 кг кадмия, 23,8 кг цинка, 1,6 кг меди, 0,46 кг никеля, 0,32 кг хрома и 0,01 кг ртути. По этим же данным годовое поступление фосфора и азота с атмосферными осадками составляет соответственно 38 и 730 кг/км² при годовой сумме осадкой 600-700 мм. Следует подчеркнуть, что полученные величины относятся к промышленным районам. Как показали наши исследования, в местах, удаленных от про-

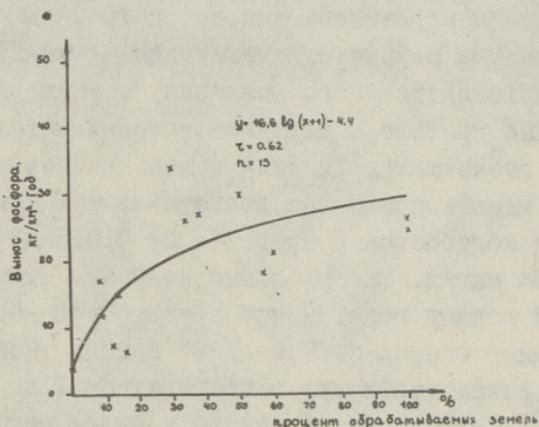
мышленных центров годовое поступление загрязняющих веществ несколько меньше. Например, поступление фосфора составляло лишь 4,8 кг и азота 107 кг/км² в год. Содержание тяжелых металлов в пробах непромышленных районов было 2 - 2,5 раза меньше, чем при непосредственном загрязнении воздуха дымовыми отходами.

Часть поступающего загрязнения выносится с водосбора поверхностными стоками либо в растворенном виде, либо во взвешенном состоянии. Вынос загрязняющих веществ с водосбора зависит от ряда факторов, основными из которых можно считать следующие: растворимость веществ, величина поверхностного стока, интенсивность эрозионных процессов и т.д. Кроме того, вынос удобрений и ядохимикатов зависит от способа, количества и времени их внесения в почву и от выпадения стокообразующих осадков. В лаборатории санитарной техники ТПИ в течение последних трех лет проводятся опыты для определения количества выноса загрязняющих веществ с водосборов малыми реками, отличающимися между собой уровнем сельскохозяйственного освоения, а также ландшафтными условиями. Как правило, содержание тяжелых металлов в воде малых рек, стекающих в Финский залив, незначительное, в несколько раз меньше предельно допустимых концентраций. Содержание ртути колеблется в пределах от 0,015 до 0,14 мкг/л, в среднем 0,034 мкг/л. Максимальные величины ртути обнаружены в осенний период года. Вынос ртути с водосбора малыми реками составляет в среднем 7,6 г/км² в год. Концентрации цинка в малых реках варьируют в пределах от 1 до 9 мкг/л, в среднем 4 мкг/л. Содержание же свинца в малых реках, особенно в водотоках Лахемааского национального парка, незначительное, составляя только 0,5-1,0 мкг/л, вынос составляет 112 - 224 г/км². Существенно колеблется в воде содержание меди (от 1 до 26 мкг/л).

Вынос биогенных элементов с водосборной площади колеблется также в широких пределах. Сток соединений азота и фосфора с водосборной площади, находящегося в естественном состоянии, в значительной степени зависит от характера водосбора. Так, с водосбора р. Алтья (хвойный лес), бедной органическими и биогенными веществами, стекает в год 0,039 кг/га фосфора и 1,58 кг/га азота, а с водосбора с низинными болотами вынос составляет 0,11 кг/га фосфора и 4,9 кг/га азота.



Фиг. 1. Содержание общего фосфора в зависимости от содержания органических веществ в воде малых загрязненных рек.



Фиг. 2. Выносы фосфора малыми водотоками в зависимости от процента обрабатываемых земель на водосборе.

Между содержанием биогенных и органических веществ в воде малых незагрязненных рек существует линейная связь (фиг. 1). В зависимости от типа почв, условий водного стока, а также интенсивности освоения водосбора вынос фосфора с сельскохозяйственных территорий составляет от 0,15 до 0,34 кг/га в год. Между выносом фосфора и интенсивностью окультуривания водосбора существует логарифмическая зависимость (фиг. 2). Вынос фосфора больше в южных районах Эстонии, где преобладают кислые почвы. В целом вынос фосфора с сельскохозяйственных угодий составляет в Эстонии менее 1%

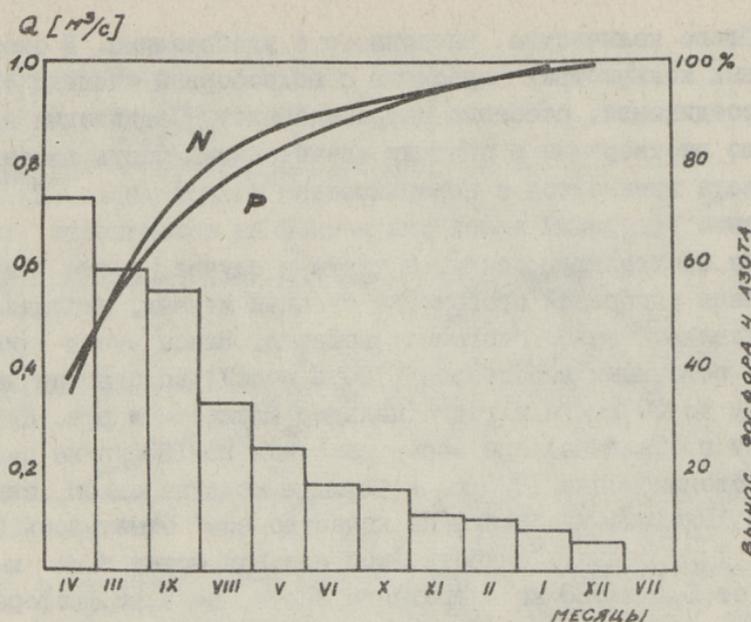
от общего количества, внесенного с удобрениями. В значительных количествах выносятся с водосборной площади азотные соединения, особенно нитратный азот. Соединения азота хорошо растворимы и поэтому значительная часть внесенного азота вымывается с поверхностным стоком (табл. 2). При внесении удобрений зимой или весной на поверхность снега или на неоттаявшую почву, а также в случае, когда после внесения удобрений происходит сильный ливень, наблюдается значительный вынос биогенных веществ. Вынос азота с интенсивно освоенных водосборов (100 % полей) доходит по нашим данным до 30 кг/га в год (полюдер Юлемисте и руч. Курна, вблизи г. Таллина) при норме внесения 95-120 кг/га азота. На состоявшемся в 1973 г. в Берлине международном симпозиуме "Влияние удобрений на качество вод" отмечалось [5], что с 1 га сельскохозяйственной площади может быть вынесено от 1,4 до 80 кг нитратного азота, до 3 кг фосфора, причем наивысшие показатели относятся к орошаемым угодьям.

Т а б л и ц а 2

Вынос минеральных удобрений с сельскохозяйственных угодий

Страна	Азот		Фосфор	
	кг/га в год	% от внесенного кол-ва	кг/га в год	% от внесенного кол-ва
Великобритания [6]	1-23		0,6	
Чехословакия [7]		20-40		~1,4
ГДР [7]	13-34	18-48	0,2-0,1	2
Голландия [8]	5-45		0-0,5	
Швейцария [8]	5-50		0,1-0,5	
США [8]	5-10	10-20	1	<2
Дания [8]	15		1	
Италия [8]	50		7	
Финляндия [9]	1-10 (60*)	10-30 (75*)	0,1-0,7	~1
ЭССР	2-30 (70*)	10-30 (80*)	0,15-0,34	<1

* - Экстремальные величины.



Фиг. 3. Среднемесячные расходы воды в убывающем порядке и интегральные кривые выноса азота и фосфора.

Наибольшее количество загрязняющих веществ выносятся с водосбора в период весеннего снеготаяния, т.е. в период максимального поверхностного водного стока (фиг. 3). Качество воды поверхностного стока (поверхностно-склоновые и поверхностно-почвенные воды) формируются на поверхности почвенного слоя или в верхнем почвенном горизонте, т.е. с поверхностным стоком выносятся с водосбора вещества загрязнения, содержащиеся в осадках, а также вещества, поступающие с поверхности водосбора, из почвогрунтов. В весенний период (в течение двух месяцев) с талыми водами выносятся с водосбора 50–55 % фосфора и азота от годового стока этих веществ, причем в течение одного месяца во время пика половодья выносятся соответственно до 40 % фосфора и 35 % азота (фиг. 3).

Таким образом, с поверхностным стоком выносятся с водосбора значительные объемы загрязнений. Для уменьшения выноса загрязнений с водосбора следует применять комплекс водоохраных мероприятий, обеспечивающих уменьшение поверхностного смыва (прибрежные водоохраные зоны, рациональное использование вносимых минеральных и органических удобрений и т.д.).

Л и т е р а т у р а

1. В и н б е р г Г.Г. Цели и задачи гидробиологии пресных вод при комплексном использовании водных ресурсов. - Водные ресурсы, 1972, № 3.
2. W i n c h e s t e r, J.W., N i f o n g, G.D. Water pollution in lake Michigan by trace elements from pollution aerosol fallout. - Water, Air and Soil Pollut., 1971, N 1, p. 50-64.
3. A s p l u n d, L. Belastingar pa Boltniska viken fran den Svenska kusten och fran nederborden, 1978, 1-21.
4. H a n s e n, J.A., L a r s e n, B., T j e l l, J.C. Tentative heavy metal budgets for the Baltic. Seminar on the recent development in the technological field in respect to prevention of pollution of the Baltic sea area. Finland, Hanasaari, 1976, p. 279-299.
5. К а м и н с к и й В.С. Методы замедления и устранения процесса евтрофирования. - Водные ресурсы, 1979, № 4, с. 51-63.
6. О у э н с М. Биогенные элементы, их источники и роль в речных системах. - Тр. советско-английского семинара "Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям", Л., 1977, с. 54-64.
7. Разработка методики оценки влияния химизации сельского хозяйства на качество поверхностных и подземных вод и мероприятий по предотвращению загрязнения вод. Сводный отчет по теме IA-2.04. СЭВ. Будапешт, 1976, с. 1-56.
8. Загрязнение воды отходами сельского и лесного хозяйства. Материалы семинара комитета по водным проблемам ЕЭК ООН. Р.И,П. Вена, 1973.
9. M u s s a a r i, I. Nutrient wash-off in the Siuntionjoki river watershed. Nordic hydrological conference and second Nordic IHP meeting. Hanasaari, 1978, p. 1157-1170.

The Wash-off of Pollutants from the Basin
of Small Rivers

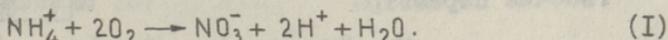
Summary

The wash-off of polluting substances from the area of basins of small rivers has been studied. On the grounds of literature and the author's experiments the discharge of atmospheric fall-out into the river basin has been discussed. The maximum fall-out of several substances from the area of the river basin has been observed in spring, e.g. during the flood runoff.

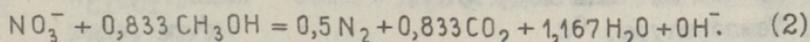
УДАЛЕНИЕ АЗОТА В МАЛЫХ АЭРАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Бытовые сточные воды содержат органический и аммонийный азот. В первичных отстойниках осаждается часть нерастворимого органического азота. В ходе биохимической очистки сточных вод часть органического азота трансформируется в неорганические формы, а часть аммонийного азота связывается в синтезе новых клеток активного ила. Удаление общего азота в ходе традиционной биохимической очистки не превышает 30 %.

На практике очистки сточных вод от азота используется ряд биологических, физических и химических методов. В малых аэрационных сооружениях является перспективным из них биологический метод нитрификации-денитрификации. В аэротенках с продленной аэрацией происходит высокое окисление аммонийного азота по суммарному уравнению:



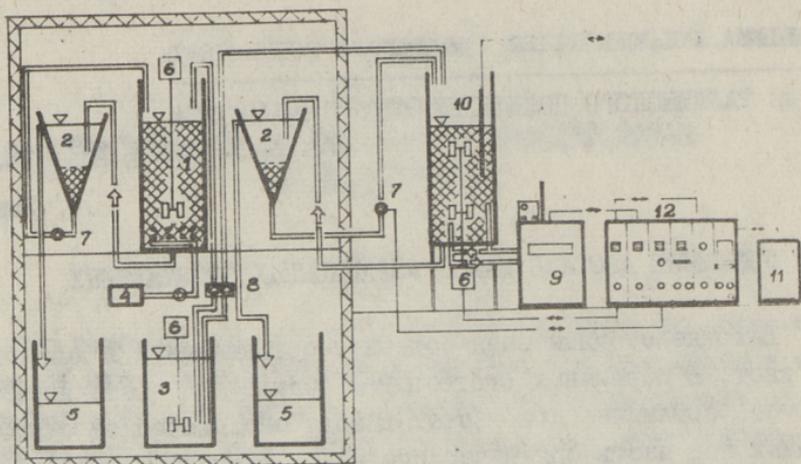
Для удаления азота в таких очистных сооружениях надо создать еще условия для процесса денитрификации, в котором нитратный азот превращается в газ азот:



В уравнении (2) метанол является донором электронов. Денитрификация протекает в анаэробных условиях.

Для выяснения параметров метода нитрификации-денитрификации в процессе продленной аэрации проводились лабораторные опыты в Тампереском политехническом институте. Схема опытной установки приведена на фиг. I.

Опыты проводились одновременно на двух параллельно работающих опытных стендах, где температура среды сохранялась соответственно +5 и +15 °С. Рабочие параметры опытных линий приведены в таблице I.



Фиг. 1. Схема опытной установки:

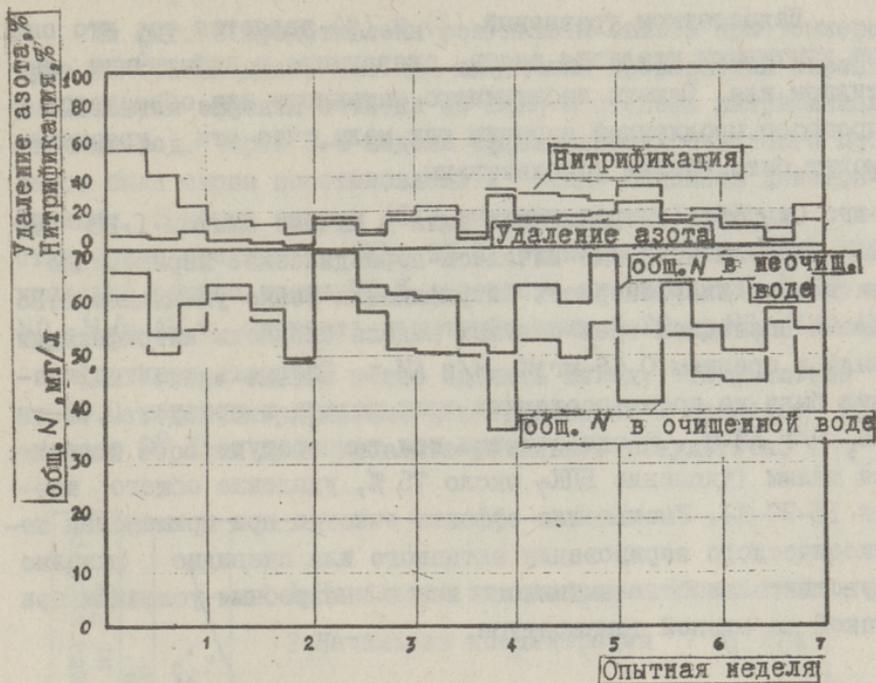
- 1 - аэрационный бассейн; 2 - отстойник; 3 - неочищенная сточная вода; 4 - насос воздуха; 5 - очищенная сточная вода; 6 - мешалка; 7 - насос возвратного активного ила; 8 - насос неочищенной сточной воды; 9 - регулятор температуры; 10 - электрод кислорода; 11 - самописец; 12 - устройство регулирования параметров очистки.

Т а б л и ц а I

Рабочие параметры опытных линий

Рабочие параметры	Опытная линия	
	№ I	№ 2
1. Объем аэрационного бассейна, л	10,2	9,2
2. Объем отстойника, л	1,6	1,6
3. Расход сточных вод, л/сут.	10-13	9-13
4. Температура, °C	5	15
5. Нагрузка, кг БПК ₇ /кг АИ (беззольн. в-ва) сут.	0,05-0,17	0,06-0,19

В опытах использовалась сточная вода из очистных сооружений города Тампере. Сточную воду привозили в лабораторию три раза в неделю. Процессы нитрификации и денитрификации проводились в аэрационной камере. Во время процесса денитрификации подача воздуха прекращалась и активный ил был в анаэробных условиях. Периоды аэрации и анаэробных условий в аэрационной камере продолжались по 2 часа.



Фиг. 2. Удаление азота при температуре 5 °С.

На фиг. 2 представлены результаты опытов при температуре 5 °С. Результаты представлены ступенчато вследствие замены неочищенной сточной воды. Скорость нитрификации рассчитана по уравнению (3)

$$r_N = \frac{\text{общ.}N^H - \text{общ.}N^0 + \text{NO}_3 - N}{t_N \cdot \text{AI}}, \quad (3)$$

где r_N — скорость нитрификации, мг $\text{NO}_3 - N / \text{г AI} \cdot \text{ч}$;

$\text{общ.}N^H$ — концентрация общего азота в неочищенной сточной воде, мг/л;

$\text{общ.}N^0$ — концентрация общего азота в очищенной сточной воде;

$\text{NO}_3 - N$ — концентрация нитратов в очищенной сточной воде;

t_N — время нитрификации, ч;

AI — концентрация активного ила по беззольному веществу, г/л.

Скорость денитрификации

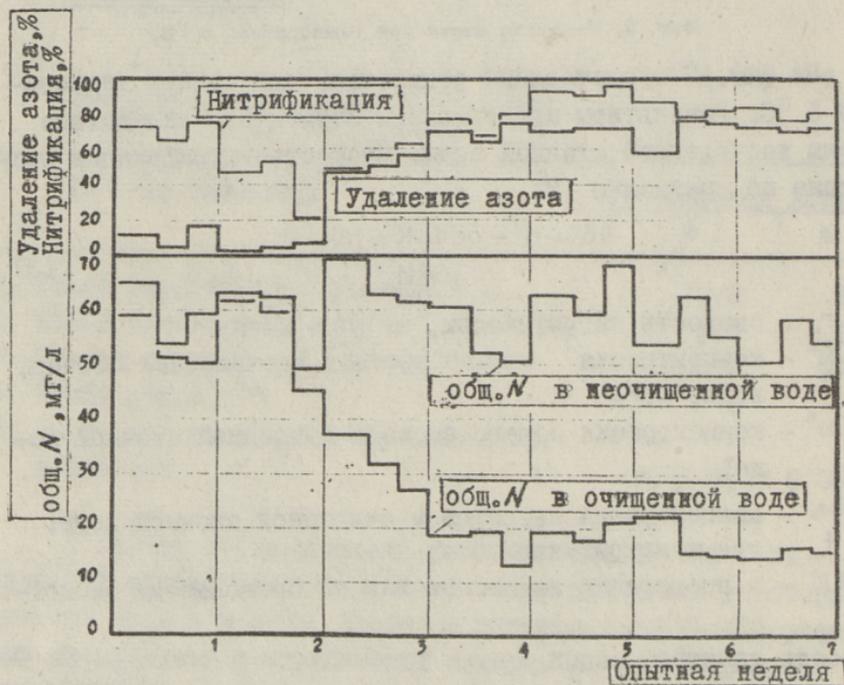
$$r_D = \frac{\text{общ.}N^H - \text{общ.}N^0}{t_D \cdot \text{AI}}, \quad (4)$$

где r_D — скорость денитрификации, мг $\text{NO}_3 - N / \text{г AI} \cdot \text{ч}$;

t_D — время денитрификации, ч.

Недостатком уравнений (3) и (4) является то, что они не учитывают удаления азота, связанного в избыточном активном иле. Однако избыточного активного ила образуется в процессе продленной аэрации так мало, что эти уравнения могут быть вполне использованы.

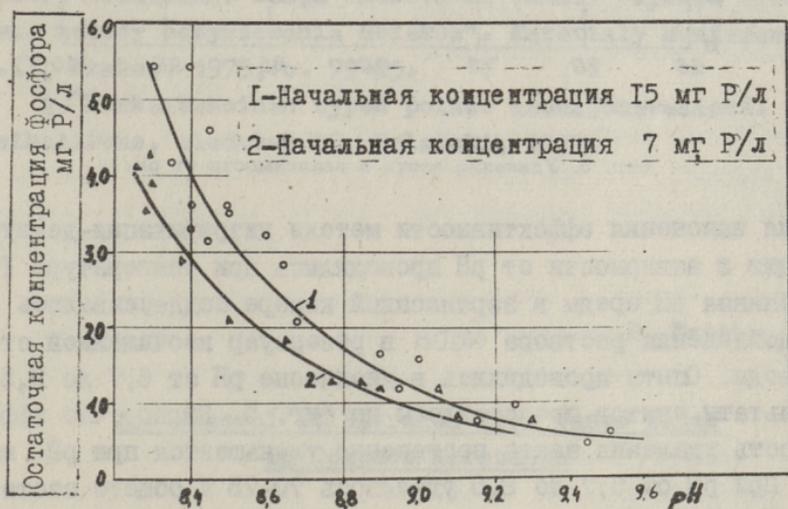
Скорость нитрификации была в начале опытов I, 88 мг $\text{NO}_3\text{-N/г АИ ч.}$ Когда началось периодическое аэрирование активного ила, скорость нитрификации резко уменьшилась. Во время последних трех опытных недель скорость нитрификации была в среднем 0,66 мг $\text{NO}_3\text{-N/г АИ ч.}$ Скорость денитрификации была во время последних трех недель в среднем 0,46 мг $\text{NO}_3\text{-N/г АИ ч.}$ Эффект очистки при температуре 5 °С остается малым (удаление БПК₇ около 75 %, удаление общего азота 15–20 %). Уменьшение эффекта очистки при применении периодического аэрирования активного ила очевидно вызвано чувствительностью активного ила к анаэробным условиям при такой же низкой температуре.



Фиг. 3. Удаление азота при температуре 15 °С.

На фиг. 3 представлены результаты опытов при температуре 15 °С. Следует, что при включении прерывистой аэрации уменьшаются эффекты очистки по БПК₇ и степень нитрификации сточных вод. Через 3-4 недели эффективность очистного процесса была снова восстановлена и также началась денитрификация. В конце опытов (5-7 опытные недели) эффект очистки был в среднем по БПК₇ 92 %, степень нитрификации 84 %, удаление общего азота 70 %, скорость нитрификации 2,70 мг NO₃-N/г АИ ч, скорость денитрификации 2,20 мг NO₃-N/г АИ ч.

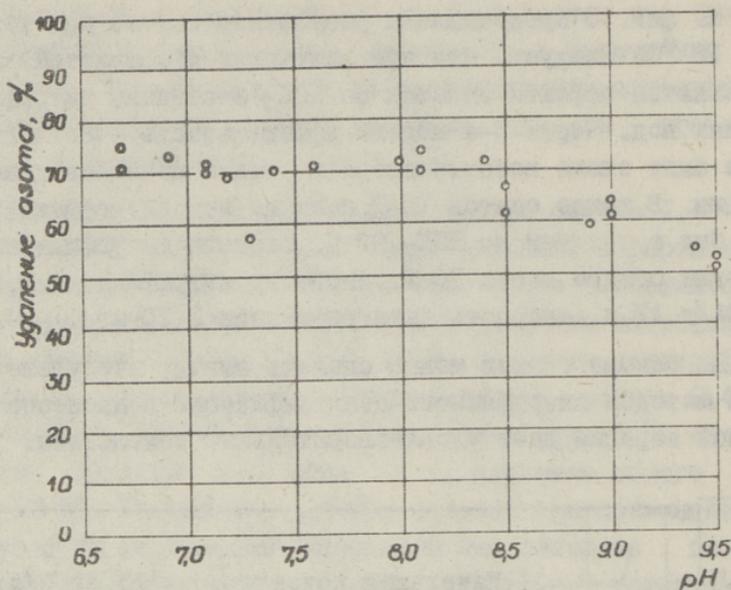
На основе опытов можно сделать вывод, что удаление азота методом нитрификации-денитрификации в процессе прерывной аэрации дает удовлетворительные результаты.



Фиг. 4. Симультанное осаждение фосфора известью.

Вторая серия опытов проводилась для выяснения влияния pH среды на процесс нитрификации-денитрификации с целью применения этого метода совместно с симультанном осаждением фосфора известью. В ТПИ выяснили, что при длительном времени аэрации сточных вод возможно симультанное осаждение фосфора при более низких значениях pH среды [1]. На фиг. 4 представлена эффективность симультанного осаждения фосфора в зависимости от pH.

Известно, что оптимальная величина pH для нитрификации 8...9 и для денитрификации 7...9 [2]. Лабораторные опы-



Фиг. 5. Удаление азота в зависимости от рН.

ты для выяснения эффективности метода нитрификации-денитрификации в зависимости от рН проводились при температуре 15°C. Постоянная рН среды в аэрационной камере поддерживалась путем добавления раствора NaOH в резервуар неочищенной сточной воды. Опыты проводились в диапазоне рН от 6,7 до 9,5. Результаты опытов представлены на фиг. 5. Видно, что эффективность удаления азота постепенно уменьшается при рН выше 8,5. При рН от 6,7 до 8,5 удалялось 70-75 % общего азота и при рН = 9,5 удаление общего азота было ниже 55 %. На основе опытов можно сделать вывод, что совместное удаление фосфора методом симультанного осаждения известью и удаление азота методом нитрификации-денитрификации можно применять в диапазоне рН среды в аэрационной камере около 9,0.

В ы в о д ы

I. Для удаления азота в малых аэрационных сооружениях, работающих в режиме продленной аэрации, целесообразно применять метод, где в аэрационной камере протекают попеременно процессы нитрификации и денитрификации. Длительность аэробных и анаэробных условий в аэрационной камере по 2 часа.

2. Удаление общего азота методом нитрификации-денитрификации при температуре 15 °С составляет около 70 %. Уменьшение эффекта очистки при температуре 5 °С (удаление общего азота 15-20 %) вызвано чувствительностью активного ила к анаэробным условиям при такой низкой температуре.

3. Симультанное осаждение фосфора известью можно совместить с удалением азота методом нитрификации-денитрификации при рН среды в аэрационной камере около 9,0.

Л и т е р а т у р а

I. Эннет П.О., Мёльдер Х.А., Вельнер Х.А. Удаление фосфора в аэротенках методом симульного осаждения. *Sesja naukova na temat: "Wysoko efektywne metody oczyszczania sciekow"*. *Materialy konferencyjne*, CZ.II, Krakow, 1975, с. 79-85.

2. Korkeastehoinen typen poisto asumajätevesistä. *Vesihallitus, tiedotus* 15, Helsinki, 1972.

P. Ennet

The Removal of Nitrogen from Waste Water in Compact Aerotanks

Summary

This article deals with a biological method for removal of nitrogen from waste water. The influence of temperature and pH on the removal of nitrogen has been shown.

Х.А. Мельдер, В.А. Блонская

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НИТРИФИКАЦИИ ПРИ МАЛЫХ
КОНЦЕНТРАЦИЯХ АЗОТА В СТОЧНЫХ ВОДАХ

В последние годы большое значение приобрела проблема создания индустриальных форельных хозяйств, водное хозяйство которых решается на базе замкнутых систем водоснабжения с очисткой сточных вод до оптимальных показателей, пригодных для выращивания этих рыб.

Сточные воды рыбохозяйств характеризуются малой концентрацией загрязнения [1]. Предыдущие работы показали, что основное загрязнение стоков — это аммоний, который токсичен для рыб [1, 2, 3].

Сравнивая известные методы удаления азота из сточных вод, мы пришли к выводу, что самым перспективным и экономически приемлемым методом очистки стоков рыбохозяйств является биологическая очистка нитрификацией.

Процессы нитрификации достаточно хорошо изучены для сточных вод с начальной концентрацией азота аммонийных солей 15–30 мг/л и более.

Для них установлены оптимальные параметры протекания данного процесса [4, 5, 6, 7, 8] в условиях свободноплавающих или прикрепленных культур.

При малых концентрациях азота (0,5–5,0 мг/л) в сточных водах в литературе нет сведений о закономерностях протекания процесса нитрификации.

Исходя из вышеизложенного, целью работы было:

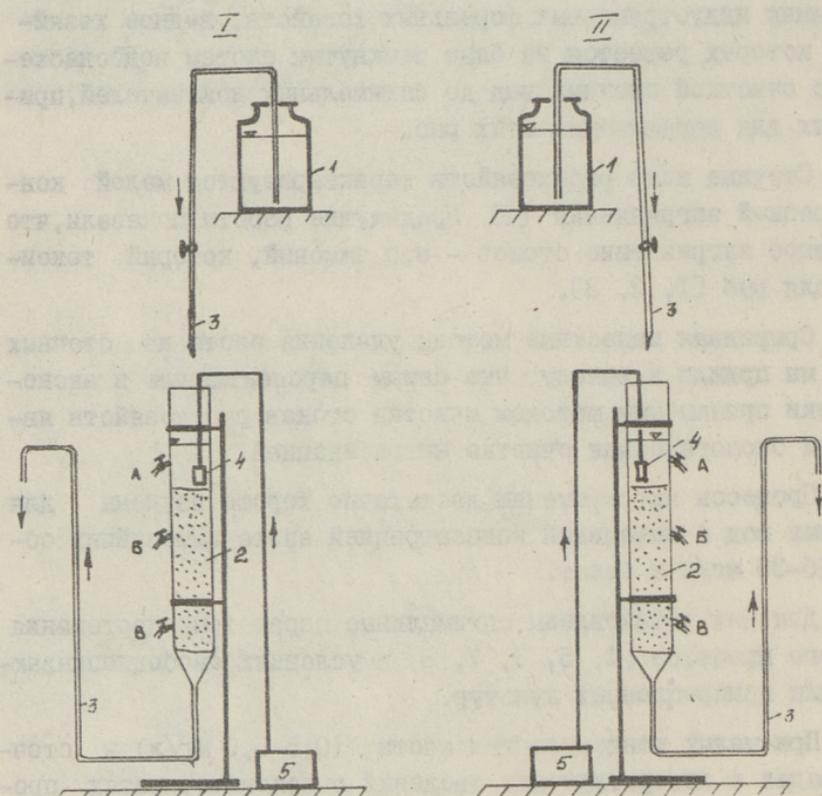
I. Исследование процесса нитрификации сточных вод с малой исходной концентрацией азота аммонийных солей в условиях прикрепленной культуры (затопленный биофильтр).

2. Установление оптимальных параметров и зависимостей данного процесса.

3. Проверка влияния различных факторов на ингибацию нитрификации.

В проблемной лаборатории санитарной техники ТПИ была смонтирована опытная установка, в которую входили (фиг. I):

- две емкости по 20 литров каждая, для содержания исходной сточной воды,
- две стеклянные колонки \varnothing 44 и 48 мм, высотой 600 мм



Фиг. 1. Схема опытной установки.

1. Емкости со сточной водой.
2. Угольные фильтры.
3. Соединительные трубопроводы.
4. Аэратор.
5. Компрессор.

А, Б, В - точки отбора проб.

1, II - первая и вторая колонки.

каждая, заполненные активным гранулированным углем АГ-3, ГОСТ 20464-75, размеры гранул 1,5-3 мм,

- трубопроводы из стекла \varnothing 10 мм, по которым сточная вода подавалась на фильтры и отводилась в канализацию.

Установка была оборудована следующими устройствами измерения:

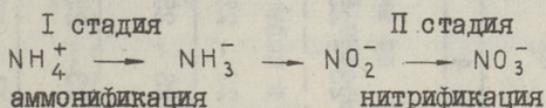
1) портативный измеритель кислорода ("Оксимет") для измерения концентрации растворенного кислорода в воде,

2) термометр (0-50 °C) для измерения температуры воды в фильтрах.

Опыты проводились в течение 4,5 месяцев.

Как известно, процесс нитрификации заключается в последовательном преобразовании азота аммонийных солей сначала в нитриты, а затем в нитраты.

В первой колонке были созданы условия для протекания полного процесса нитрификации, во второй колонке были созданы условия для II стадии нитрификации, т.е. для преобразования нитритов в нитраты.



Синтетическая сточная вода была выбрана на основе среды Stephenson [9] и включала следующие вещества в граммах на I литр воды:

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	- 0,0147
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	- 0,030
$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	- 0,010
$(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$	- 0,006

Для II стадии нитрификации вместо $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ применялся NaOH в количестве 0,003 г/л. Все опыты проводились без наличия органики в стоке.

Искусственный сток пропусклся через колонки, заполненные активированным углем. Подача кислорода обеспечивалась аэрацией слоя воды над фильтром пористым мелкопузырчатый аэратором и капельным падением жидкости.

Т а б л и ц а I

Основные показатели исследованных режимов

№ ре- жима	Реакция среды, рН	Нагрузка, $\frac{\text{г NH}_4\text{-N} \cdot \text{сут}^{-1}}{\text{м}^3 \text{ загрузки}}$ $\frac{\text{г NO}_2\text{-N} \cdot \text{сут}^{-1}}{\text{м}^3 \text{ загрузки}}$	Темпе- ратура, °С	Количество растворенного в воде кислорода, мг/л	Средний эффект очистки по $\frac{\text{NH}_4\text{-N}}{\text{NO}_2\text{-N}}$ %
I	2	3	4	5	6
	7,30 - 7,35	40			79
	7,0 - 7,55	80	23 - 25	8,68 - 8,38	54
I	7,63	4	23 - 25	8,68 - 8,38	64
	7,60 - 7,75	8			94
	7,70	40	23 - 25	верх. часть 8,68-8,38 нижняя часть - 0	A-79, B-66, B-49
2	7,84	4	23 - 25	верх. часть 8,68-8,38 нижняя часть - 0	A-64, B-43, B-35
	7,35 - 7,89		I4 - I5	10,37 - 10,15	48
	7,25 - 7,75	40	I9	9,35	61
	7,30 - 7,35		23 - 25	8,68 - 8,38	79
3					

I	2	3	4	5	6
3	7,31 - 7,88 7,40 - 8,05 7,63	4	14 - 15 19 23 - 25	10,37 - 10,15 9,35 8,68 - 8,38	37 - 64
4	7,7 5,92 - 6,24 7,84 5,90 - 6,34	40 4	23 - 25 23 - 25	8,68 - 8,38 8,68 - 8,38	82 79 64 74

Примечание: Данные для каждого режима в первой строчке для I колонки, а во второй строчке для II колонки.

Для изучения влияния количества растворенного кислорода на нитрификацию пробы брались в 3 точках А, Б, В по высоте фильтра.

Три раза в неделю брались пробы на выходе из фильтров по 0,5 л для химических анализов и определялись следующие показатели загрязнения воды:

- азот аммонийных солей $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ колориметрически реактивами Несслера,
- нитриты $\text{NO}_2^- - \text{N}$ колориметрически реактивом Грассера,
- нитраты $\text{NO}_3^- - \text{N}$ колориметрически фенолсульфоновой кислотой.

А также измерялась температура воды, pH среды и концентрация растворенного в воде кислорода.

В ходе эксперимента было исследовано влияние нагрузки, концентрации растворенного в воде кислорода, температуры и реакции среды на нитрификацию при исходной концентрации азота аммонийных солей в сточных водах - 4,0 мг/л (см. табл. I) и были получены следующие результаты:

I. При увеличении нагрузки в 2 раза с

$$40,0 \frac{\text{г NH}_4^+ - \text{N}}{\text{м}^3 \text{загрузки}} \cdot \text{сут}^{-1} \text{ до } 80,0 \frac{\text{г NH}_4^+ - \text{N}}{\text{м}^3 \text{загрузки}} \cdot \text{сут}^{-1} \text{ (в I колонке)}$$

эффективность нитрификации уменьшается в 1,5 раза. Следовательно, высокая нагрузка ингибирует нитрификацию. Во II колонке с увеличением нагрузки в 2 раза с $4,0 \frac{\text{г NO}_2^- - \text{N}}{\text{м}^3 \text{загрузки}} \cdot \text{сут}^{-1}$ до $8,0 \frac{\text{г NO}_2^- - \text{N}}{\text{м}^3 \text{загрузки}} \cdot \text{сут}^{-1}$ эффективностью II стадии нитрификации увеличивается в 1,5 раза.

2. По глубине фильтра также в обеих колонках наблюдалась ингибация нитрификации, что можно объяснить отсутствием требуемого минимального уровня растворенного кислорода (2,0 мг/л) в фильтрате. При этом процесс нитрификации идет в обратном направлении, т.е. концентрация азота аммонийных солей увеличивается по глубине, а концентрация нитратов уменьшается.

3. Максимальная эффективность процесса нитрификации наблюдалась при температуре 25 °С. Рост микробов увеличился с увеличением температуры. Так при увеличении температуры на 10 °С (с 14 до 24 °С) константа скорости роста нитрифицирующих организмов увеличивается в 3 раза.

4. Исследуя процессы нитрификации при $pH = 7,7$ и $pH = 5,92-6,24$ мы наблюдали, что pH в этих пределах мало влияет на нитрификацию. Также было замечено, что искусственная сточная вода и система на загрузке обладают буферностью.

Учитывая особенности разведения форели в замкнутых оборотных системах водоснабжения, рекомендуемые оптимальные параметры нитрификации будут следующими:

- температура $19^{\circ}C$;
- реакция среды $7,25-7,75$;
- количество растворенного кислорода должно быть более $2,0$ мг/л;

- исходная концентрация азота аммонийных солей должна быть более $1,0$ мг/л, а нитритов более $0,1$ мг/л.

В таких условиях при нагрузке $40,0 \frac{г NH_4^+ - N}{м^3 \text{ загрузки} \cdot \text{сут}}$ (в I колонке) максимальный эффект удаления азота аммонийных солей составил 61% .

Л и т е р а т у р а

1. М ё л ь д е р Х.А., П и к к о в Л.И. Проблемы удаления азотистых соединений из оборотных вод рыбного хозяйства. Тезисы докладов на II Всесоюзном совещании по антропогенному эвтрофированию природных вод, 19-23 декабря 1977 года.

2. Б л о н с к а я В.А., М ё л ь д е р Х.А., П и к к о в Л.М. Очистка вод в системах оборотного водоснабжения форелевых хозяйств. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 472, 1979.

3. Л у к и н н ы х Н.А., Л и п м а н Б.Л., К р и ш т у л В.П. Методы доочистки сточных вод. М., Стройиздат, 1978.

4. С а г а д е е в а Л.В. Глубокая доочистка сточных вод от биогенных элементов. М., 1973. Автореферат дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук.

5. B o w e r, C.E. et al. Ionization of ammonia in seawater. Effects of temperature, pH and salinity. - J. Fish. Res. Board. Can., 1978, vol. 35, § 7.

6. S u t t o n, P.M. et al. Efficacy of biological nitrification. - J. W. P. C. F., 1975, vol. 47, § 11.

7. S h a r m u, B., A h l e r t, R.C. Nitrification and nitrogen removal. - Water Research, 1977, vol. 11.

8. A n t h o n i s e n, A.C. et al. Inhibition of nitrification by ammonia and acid. - J. W. P. C. F, 1976, vol. 48, § 5.

9. B c e r, C. et al. Kinetics and control tests of nitrification - denitrification process, Part 2: Respiration and control tests. - Environmental Technology 76, Institute of Environmental Sciences. Philadelphia, Pennsylvania, April 26-28, 1976.

H. Mölder, V. Blonskaya

Research on the Process of Nitrification
with Small Amounts of Ammonia

Summary

On the basis of laboratory studies we have determined the optimum means for nitrification with small amounts of ammonia (4.0 mg/l).

СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО ОТПУСКА ТЕПЛА НА
ОТОПЛЕНИЕ ЗДАНИЙ

Программный отпуск тепла предусматривает уменьшение либо увеличение подачи тепла в здание в отдельные часы суток или недели против количеств, определенных из условий стабилизации температурного режима в помещениях.

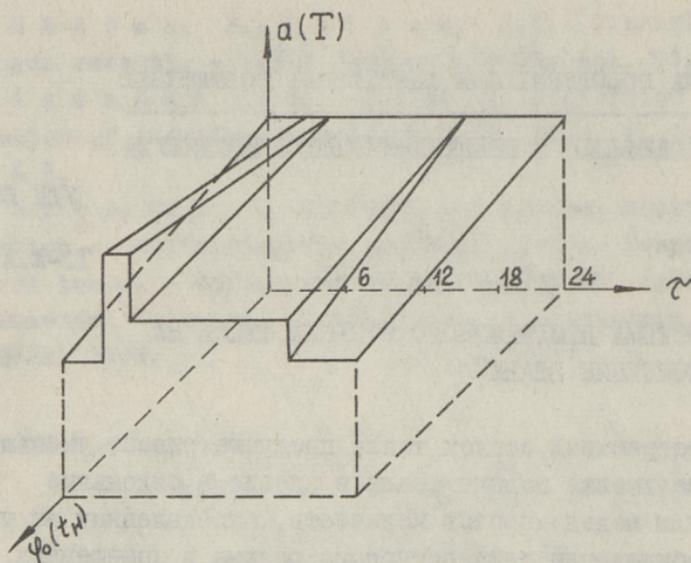
Основные задачи, которые решает программное регулирование, сводятся к следующему:

- сокращение подачи тепла в жилые здания в ночные часы с целью улучшения санитарно-гигиенических условий в отапливаемых помещениях (сон людей становится более глубоким, самочувствие после сна улучшается) и уменьшения расхода топлива на отопление этих зданий;

- сокращение подачи тепла в административно-общественные здания в нерабочее время с целью уменьшения расхода топлива;

- уменьшение подачи тепла на отопление в периоды максимального потребления горячей воды на бытовые нужды с целью сокращения расчетных расходов воды в тепловой сети, экономию капиталовложений на сооружение тепловой сети и стационарного оборудования и снижение расходов электроэнергии на перекачку теплоносителя.

На фиг. I приведен примерный график программного регулирования, предусматривающий отпуск в жилые здания в ночные часы при различных температурах наружного воздуха. Как видно, режимы программного отпуска тепла зависят не только от времени суток (τ), но и от коэффициента расхода тепла на отопление (φ_0) или, что то же самое, от температуры наружного воздуха (t_n). Наибольшая глубина регулирования имеет место при малых тепловых нагрузках. При



Фиг. 1. Примерный режим программного отпуска тепла:

a - коэффициент программного регулирования; t - температура теплоносителя; φ_0 - коэффициент отпуска тепла; t_n - температура наружного воздуха; τ - время, сутки.

расчетном отпуске тепла ($\varphi_0 = 1$) программное регулирование не предусматривается ($a = 1$), так как система отопления работает при режиме на полную расчетную мощность в течение всего времени суток.

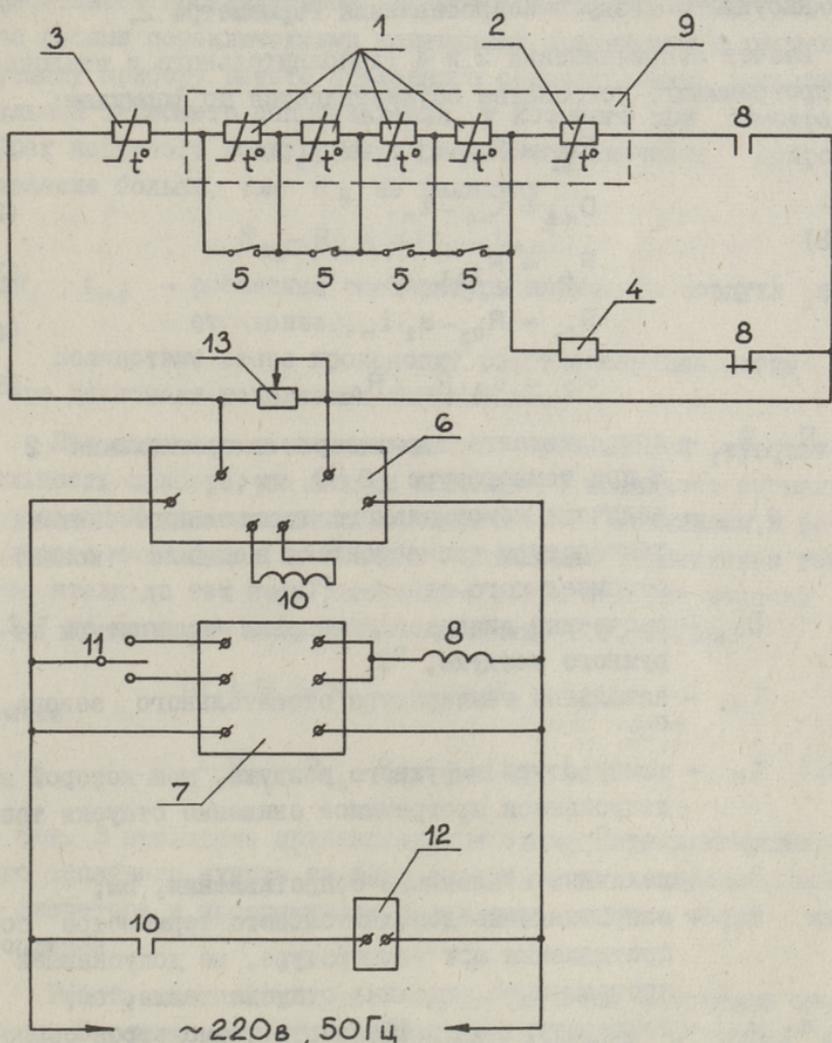
К сожалению, известные программные регуляторы не учитывают температуру наружного воздуха (коэффициент расхода тепла) при определении величины отпуска тепла на отопление зданий (например, во время программного снижения отпуска тепла).

Для корректировки величины снижения отпуска тепла на отопление в зависимости от температуры наружного воздуха разработано новое программное устройство, которое снабжается специальным датчиком.

Принцип действия устройства поясняется электрической схемой на фиг. 2, разработанного программного регулятора отпуска тепла на отопление зданий.

Датчик температуры наружного воздуха 9 включает в себя базовые и добавочные термометры сопротивления I с отно-

шением омического сопротивления, определяемым рядом двоичного кода и дополнительный термометр сопротивления 2. Термометры сопротивления 1, 2 и датчик температуры теплоносителя 3 подключены к щиту управления, на котором смонтирован регулирующий прибор 6, реле "больше" тепла 10,



Фиг. 2. Принципиальная электрическая схема местного программного регулятора отопления:
 1 - базовые и добавочные термометры сопротивления;
 2 - дополнительный термометр сопротивления;
 3 - датчик температуры теплоносителя; 4 - эталонное сопротивление; 5 - тумблер настройки отопительного графика; 6 - регулирующий прибор; 7 - реле времени;
 8 - промежуточное электромагнитное реле; 9 - датчик температуры наружного воздуха; 10 - реле "больше" тепла; 11 - избиратель программы, 12 - клапан с электромагнитным приводом, 13 - переменный резистор.

тумблеры настройки отопительного графика 5 и программное устройство. Программное устройство включает в себя реле времени 7, промежуточное электромагнитное реле 8, избиратель программы II, постоянное эталонное сопротивление 4, которое является эталоном для изменяющегося в зависимости от температуры наружного воздуха сопротивления термометра 2.

Расчет сопротивлений 2 и 4 (дополнительного и эталонного) программного устройства осуществляется по формулам:

$$R_{02} = R_{03} \cdot \Delta t_{т.п} / D_{н.в}, \quad (1)$$

$$D_{н.в} = t_{н.0} - t_n, \quad (2)$$

$$R_4 = R_{t_2}, \quad (3)$$

$$R_{t_2} = R_{02} - \alpha_2 \cdot t_n, \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 \cdot R_{02} / R_{03}, \quad (5)$$

где R_{02}, R_{03} - сопротивление термометров сопротивления 2 и 3 при температуре 0°C , ом;

$\Delta t_{т.п}$ - величина максимального программного снижения температуры теплоносителя в начале (конце) отопительного сезона, $^\circ\text{C}$;

$D_{н.в}$ - расчетный диапазон изменения температуры наружного воздуха, $^\circ\text{C}$;

$t_{н.0}$ - начальная температура отопительного сезона, $^\circ\text{C}$;

t_n - температура наружного воздуха, при которой не допускается программное снижение отпуска тепла, $^\circ\text{C}$;

R_4 - величина эталонного сопротивления, ом;

R_{t_2} - сопротивление дополнительного термометра сопротивления при температуре, не допускающей программного снижения отпуска тепла, ом;

α_2, α_3 - температурные коэффициенты термометров сопротивлений 2 и 3, ом/ $^\circ\text{C}$.

Работа прибора осуществляется следующим образом.

При соответствии температуры теплоносителя значению, заданному отопительным графиком, сумма последовательно включенных сопротивлений - 3, I, 4: $R_{t_3} + R_{t_1} + R_4 = \text{const}$, а значит, измерительный мост, остается сбалансированным.

Программное реле времени реализует заложенную при настройке циклически повторяющуюся суточную программу путем замыкания в периоды снижения отпуска тепла своих нормально-открытых контактов.

В эти периоды при замыкании контактов реле времени срабатывает промежуточное электромагнитное реле 8, которое своими переключающими контактами подключает к регулирующему прибору вместо эталонного сопротивления дополнительный термометр сопротивления, у которого при температурах наружного воздуха выше расчетного значения сопротивление больше, чем R_4 на величину

$$R_{t_2} - R_4 = \alpha (t_n - t_{н.р}), \quad (6)$$

где $t_{н.р}$ - расчетная температура наружного воздуха на отопление.

Вследствие этого происходит разбалансировка моста и в его диагонали появляется напряжение.

При величине этого напряжения, превышающий чувствительность прибора, на выходе последнего возникает сигнал, достаточный для включения исполнительного механизма, в результате чего будет происходить повышение температуры теплоносителя до тех пор, пока общее сопротивление цепочки 3-2-1 не вернется к прежнему значению, т.е. когда

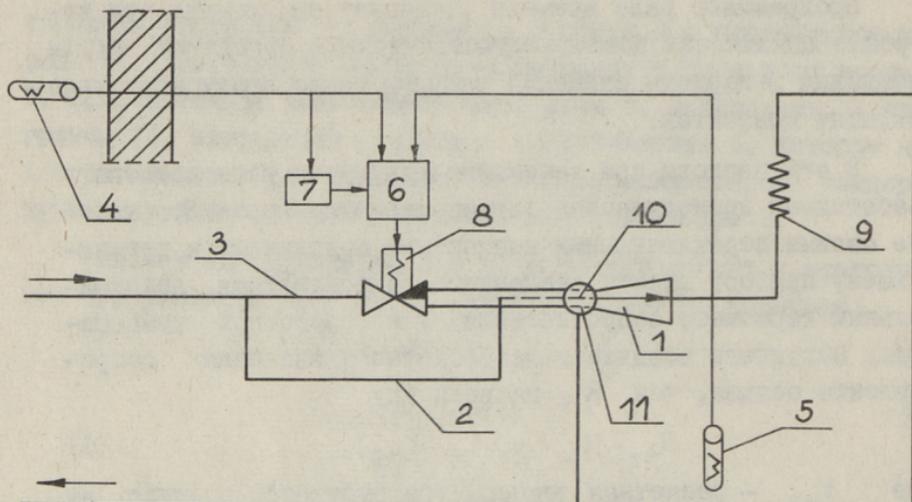
$$R'_{t_3} + R_{t_1} + R_{t_2} = R_{t_3} + R_{t_1} + R_4, \quad (7)$$

причем

$$R_{t_3} - R'_{t_3} = R_{t_2} - R_4 = \alpha_2 (t_n - t_{н.р}). \quad (8)$$

На фиг. 3 приведена принципиальная схема автоматизированного теплового пункта на базе разработанных двухсоплового элеватора и программного регулятора отпуска тепла на отопление.

Работа теплового пункта осуществляется следующим образом. В теплые периоды отопительного сезона, а также в периоды программного снижения отпуска тепла, когда температура обратной воды завышена, двухпозиционный электромагнитный вентиль закрыт и подача сетевой воды в камеру смешения двухсоплового элеватора осуществляется только через дополнительный трубопровод (байпас) и дополнительное сопло. В этом случае понижение температуры воды и со-



Фиг. 3. Автоматизированный тепловой пункт с двухсопловым элеватором:

1 - двухсопловый элеватор; 2 - дополнительный трубопровод прямой сетевой воды (байпас); 3 - трубопровод прямой сетевой воды; 4 - датчик температуры наружного воздуха; 5 - датчик температуры теплоносителя; 6 - регулирующее устройство; 7 - программное устройство; 8 - электромагнитный вентиль; 9 - система отопления; 10 - дополнительное сопло; 11 - базовое сопло.

хранение необходимого расхода теплоносителя в системе отопления здания обеспечивается за счет работы двухсоплового элеватора с повышенным коэффициентом смешения (у элеватора находится в работе только сопло с минимальным диаметром).

В эти периоды расход сетевой воды, идущей на отопление здания, минимален. В периоды, когда температура обратной воды в системе отопления оказывается меньше требуемой, с помощью регулирующего органа, расположенного на трубопроводе прямой сетевой воды, подключается в работу базовое сопло элеватора. В результате этого увеличивается расход сетевой воды, идущей на отопление абонента, а коэффициент смешения элеваторного узла падает.

В качестве датчиков температуры в регуляторе используются медные термометры сопротивления.

Настройка регулятора на выбранный отопительный график производится подбором требуемой суммы сопротивлений датчика наружного воздуха, осуществляется это дистанционно со щита управления с помощью настроечных тумблеров.

При этом использование датчика теплоносителя на обратной линии обеспечивает минимальное количество датчиков.

Регулирующим прибором регулятора служит транзисторный усилитель.

Рабочим органом регулятора является электромагнитный вентиль И5 кч 877(892) бр - СВВ или И5 ч 888 р - СВМ, переоборудованный для применения на горячей воде.

Использование предлагаемой системы программного отпуска тепла на отопление зданий позволяет получить значительную экономию тепла и улучшить качество теплоснабжения. При этом корректировка программного отпуска тепла в зависимости от текущей температуры наружного воздуха дает дополнительную экономию тепла и улучшает температурный режим отапливаемых помещений.

Ниже приведены экономические показатели системы программного отпуска тепла на отопление зданий. Вследствие отсутствия опыта эксплуатации полностью автоматизированной системы централизованного теплоснабжения района (в Таллине пока имеются лишь отдельные экспериментальные автоматизированные тепловые пункты) расчет ожидаемой экономической эффективности внедрения систем осуществляется только по получаемой экономии тепла на отопление обслуживаемых зданий.

Дополнительные капиталовложения K_q , связанные с внедрением системы отпуска тепла на отопление на один элеваторный тепловой пункт составляют 550 рублей.

Снижение годовых эксплуатационных расходов, получаемых за счет экономии тепловой энергии, можно рассчитать по формуле

$$I_T = \mu \cdot Q_{от}^{cp} \cdot z_{от} \cdot I_T, \quad (9)$$

где μ - относительная величина среднесезонной экономии тепла (по данным эксплуатационных испытаний $\mu = 0,15$);

$Q_{от}^{cp}$ - среднесезонная тепловая нагрузка на отопление (для 90 квартирного здания серии "I-464A" $Q_{от}^{cp} = 0,2$ МВт);

$z_{от}$ - число часов отопительного сезона (можно принимать 6000 часов для гор. Таллина);

I_T - стоимость 1 МВт·ч тепловой энергии (можно принимать $I_T = 3,75$ руб./МВт·ч для г. Таллина).

По упомянутым данным снижение годовых эксплуатационных расходов за счет экономии тепловой энергии I_T для одного теплового пункта (здания) составляет 675 рублей.

Годовые расходы на амортизацию, текущий ремонт, электроэнергию и заработную плату персонала на один программный регулятор составляют 120 руб.

Таким образом, снижение годовых эксплуатационных расходов $\Delta И$ составляет 555 рублей.

Годовую экономическую эффективность внедрения системы программного отпуска тепла можно определить из выражения

$$\mathcal{E} = \Delta И - E_H \cdot K_D, \quad (10)$$

где E_H - нормативный коэффициент окупаемости дополнительных капиталовложений в коммунальном хозяйстве СССР, $E_H = 0,12$.

Годовая экономическая эффективность внедрения системы программного отпуска тепла на отопление для одного теплового пункта в здании серии I-464A составляет 495 руб.

Для жилрайона (города) тепловой мощностью на отопление 450 МВт годовая экономическая эффективность составляет 550 тыс. руб., а экономия тепла 270 тыс. МВт·ч.

В ы в о д ы

Система программного отпуска тепла на отопление зданий на базе двухсуплового элеватора отличается высокой надежностью, позволяет повысить качество теплоснабжения и обеспечивает значительную экономию тепла и топлива.

Л и т е р а т у р а

1. Ч и с т о в и ч С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления. Л., Стройиздат, 1975.

2. К н й в Т.-А.А. Разработка и исследование системы скоординированного отпуска тепла на отопление и горячее водоснабжение жилых зданий в условиях непосредственного водоразбора. Автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Л., 1977 (ЛИСИ).

Programme Regulator for Central Heating
Systems

Summary

In the article the working principle of a new programme device is presented.

The schemes of principle of the programme regulator for the central heating systems on the basis of a two nozzle jet pump and the economic calculations are given.

С о д е р ж а н и е

1.	Л.Я. Айнола, Т.А. Коппель, Ю.Ю. Ламп, У.Р. Лийв. Спектральный анализ ускоренного турбулентного движения жидкости в трубопроводах.	3
2.	Э.Г. Каск. Экспериментальное исследование распределения скоростей по живому сечению при возникновении движения жидкости в трубопроводе. .	17
3.	Э.Г. Каск. Изменение средней скорости в зависимости от скорости нарастания давления при неустановившемся движении жидкости в трубах. . . .	23
4.	Л.Я. Айнола, У.Р. Лийв. О математических моделях исследования нестационарных течений жидкости в трубах.	29
5.	Г.Т. Гроссшмидт. Четырехполюсные модели элементов гидравлических трасс гидроприводов для расчета частотных характеристик.	41
6.	Г.Т. Гроссшмидт, Ю.И. Ванавески, А.А. Сакариас. Расчет частотных характеристик гидравлических трасс гидроприводов с применением ЭВМ.	51
7.	Я.Я. Кару, В.В. Реммель, В.Х. Палль. Исследование технологических свойств воды водоисточника при решении водохозяйственных задач. . .	61
8.	Т.А. Куриссоо. Тепловыделение при биоокислении загрязняющих веществ.	67
9.	А.А. Ляэне, Х.Х. Лихмуссаар. Прогноз изменения осредненной концентрации нефтепродуктов в Балтийском море.	77
10.	Э.Э. Кирт. Утилизация и доочистка сточных вод картофелекрахмального производства.	85
11.	Я.Я. Кару, О.П. Паулус. О роли регенерации сетки при микрофильтровании сточных вод.	97
12.	Э.О. Лойгу, Х.А. Вельнер, А.Э. Саава. Вынос загрязняющих веществ с водосбора малых водотоков	103
13.	П.О. Эннет. Удаление азота в малых аэрационных сооружениях.	111
14.	Х.А. Мельдер, В.А. Блонская. Исследование процесса нитрификации при малых концентрациях азота в сточных водах.	119
15.	Т.-А.А. Кыйв. Система программного отпуска тепла на отопление зданий.	127



руб. 1.10