Ep.6.7
569

ISSN 0136-3549
0203-9702

TALLINNA
POLÜTEHNILISE INSTITUUDI
TOIMETISED
569

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

TPI
'84

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Ер.6.7

569

TPI '84

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.621
628.34

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Санитарная техника XVII

Таллин 1984

АН ЭССР
Научная библиотека
TALLINN
Teaduste Akadeemia Raamatukogu

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Труды ТПИ № 569

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ
Санитарная техника ХУП
На русском языке
Отв. редактор В. Сууркаск
Техн. ред. М. Тамме
Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 13.01.84
Подписано к печати 09.07.84
МВ-08017
Формат 60x90/16
Печ. л. 4,75+0,25
Уч.-изд. л. 4,7
Тираж 300
Зак. № 438
Цена 70 коп
Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла 2/9

© Таллинский политехнический институт, 1984

№ 569
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.542.595

Э.Г. Каск, Л.Л. Пааль

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ УСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В НАПОРНЫХ ТРУБАХ

Согласно СНиП П-3I-74 [I] (Водоснабжение, наружные сети и сооружения) следует предусматривать меры защиты системы водоснабжения от повышения давления. При этом внезапное повышение давления необходимо определить расчетом и на основании расчета, исходя из величины рабочего давления принимать меры защиты, обеспечивающие применение труб. Кроме этого СНиП-ом допускается использование труб более высокого класса прочности в случаях, когда увеличение стоимости труб меньше стоимости мероприятий по защите трубопровода от повышения давления.

Часто, исходя из конкретных условий, принимают, что трубопровод характеризуется недеформируемыми стенками и жидкость можно принимать несжимаемой. В этом случае неустановившееся движение в напорном трубопроводе описывается уравнением Бернулли [2]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(z+\frac{p}{\rho g}+\frac{\alpha V^2}{2g}\right)=-\frac{\partial h_L}{\partial x}-\frac{\alpha_0}{g}\frac{\partial V}{\partial t}, \qquad (I)$$

где p – давление;
V – средняя скорость;
x – продольная координата трубопровода;
t – время;
h_L – потери энергии вдоль трубопровода;
α_0 – коэффициент количества движения;
z – геодезическая высота;
ρ – плотность жидкости;
g – ускорение силы тяжести;
α – коэффициент кинетической энергии.

Имея в виду, что

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t}, \qquad (2)$$

где Q - расход жидкости;
A - площадь сечения;

инерционный напор в уравнении (I) можно выразить как (при $A = const$)

$$h_i = \frac{\alpha_0 L}{gA}\frac{dQ}{dt}, \qquad (3)$$

где L - длина трубы.

Таким образом, для горизонтального трубопровода, имеющего постоянный диаметр вдоль трубы, повышение давления можно определить по формуле

$$\Delta\left(\frac{P}{\rho g}\right) = h_L + \frac{\alpha_0 L}{gA}\frac{dQ}{dt}. \qquad (4)$$

Последняя формула позволяет формально определить величину повышения давления в трубопроводе в любой момент времени. Для этой цели следует определить потери энергии на трение и функцию изменения во времени ускорения. К сожалению, формула (4) не может быть прямо использована для практических расчетов. Если в первом приближении принять, что потери энергии на трение в режиме неустановившегося движения равны потерям равномерного установившегося движения, то открытой остается закономерность

$$Q = f(t), \qquad (5)$$

из которой может быть определен закон изменения ускорения.

Характер функции (5) зависит от режима работы регулирующего органа, который, в свою очередь, зависит от конструкции последнего и в основном от закона регулирования. В связи с этим необходимо подчеркнуть, что указанный вопрос требует специального исследования.

В результате теоретического и экспериментального исследований в лаборатории гидравлики ТПИ было установлено [3, 4], что возникающее повышение давления во время неустановившегося движения во многом зависит от внутренней структуры потока. Сюда относятся такие факторы, как распределение скоростей в живом сечении потока, режим течения и т.д. От этих факторов зависят потери энергии на трение, а также устойчивость ламинарного режима течения.

Полученные результаты исследования позволяют учитывать все эти факторы и влияние их на процесс развития неустановившегося движения. На наш взгляд существенным является вывод о том, что максимальное повышение давления в трубопроводе имеет место при ламинарном режиме течения [4]. Этот факт, доказанный теоретически и экспериментально, позволил использовать для разработки новых расчетных формул строгий теоретический подход, т.е. уравнения Навье-Стокса в линеаризованной системе.

В работе [4] было доказано, что максимальная величина повышения давления наблюдается всегда при максимальной величине ускорения и не зависит от предыдущей истории изменения во времени ускорения. Поэтому для практических расчетов напорного режима следует определить только величину максимального ускорения.

Учитывая все вышеприведенные обстоятельства, можно считать, что применение модели ламинарного режима течения для определения повышения давления является, по сравнению с существующими методами, новым подходом к решению задачи расчета напорных трубопроводов при неустановившемся движении жидкости.

Предлагаемый нами метод является универсальным еще в связи с тем, что он позволяет определить не только максимальную величину повышения давления, но и весь процесс от начального момента регулирования, т.е. функцию

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = f(t). \qquad (6)$$

В общем случае для рассматриваемого напорного трубопровода может быть определена зависимость

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho g}\right)_{макс} = f\left(\frac{dV}{dt}\right), \qquad (7)$$

причем величины $\frac{dV}{dt}$ определяются исходными данными.

Нужно отметить, что в некоторых случаях подобная постановка задачи о неустановившемся движении жидкости не может привести к удовлетворительным результатам. Сюда относятся конкретные случаи, когда нельзя пренебречь упругими свойствами стенок трубопровода и жидкости. Решение таких задач приводит к рассмотрению явления гидравлического удара, который в данной статье не рассматривался.

При расчете нестационарного режима течения жидкости в напорных трубопроводах по методике, предложенной в работе [5], определяется максимальное повышение или понижение давления в трубопроводе.

Как показывают проведенные опыты, даже при внезапном регулировании расхода максимальная амплитуда давления наблюдается при истечении некоторого времени от момента начала регулирования, когда имеет место максимальное значение градиента средней скорости. Момент появления максимального значения ускорения зависит от инерционной емкости системы.

Согласно разработанной нами расчетной модели неустановившегося движения, решающее влияние на величину максимальной амплитуды давления оказывает максимальное значение ускорения. Для этой цели ниже приводится методика определения максимальной величины напора в условиях ускоренного движения жидкости в трубопроводе. Некоторые сведения в этом направлении приведены в работе [6], результаты которой, к сожалению, неприменимы без упрощения. Поэтому мы считаем целесообразным привести ниже методику определения максимальной величины ускорения в полном виде.

Для обработки указанной методики предлагаем, что:

1) при сравнительно медленных изменениях открытия регулирующего органа можно отказаться от сжимаемости жидкости и деформации стенок трубопровода;

2) считаем, что потери энергии в режиме неустановившегося движения мало отличаются от потерь, наблюдаемых при стационарном режиме течения.

Первое допущение совершенно справедливо, учитывая результаты анализа, приведенные в работе [5]. Для уточнения второго допущения мы можем использовать результаты экспериментальных работ, изложенные в [7]. На основании этих данных можно заключить, что потери энергии в режиме неустановившегося движения отличаются максимально на 10 % от потерь, наблюдаемых в режиме установившегося движения.

Согласно уравнению Бернулли полный напор в режиме неустановившегося движения определяется

$$H = \frac{\alpha V^2}{2g} + h_L + h_i , \qquad (8)$$

где h_i - инерционный напор, который для цилиндрических напорных труб определяется зависимостью

$$h_i = \frac{\alpha_0}{g}\int_{x_1}^{x_2} \frac{dV}{dt}\,dx. \qquad (9)$$

В условиях систем трубопроводов, где каждый участок имеет длину L_i и площадь поперечного сечения A_i, можем при $Q = const$ для каждого трубопровода принять $L_i A_i = const$ и в этом случае выражение (8) имеет вид

$$H = \frac{\alpha V^2}{2g} + h_L \frac{\alpha_0}{g}\frac{dQ}{dt}\int_0^1 \frac{dx}{A} = \frac{\alpha V^2}{2g} + h_L + \frac{\alpha_0 C}{g}\frac{dQ}{dt}, \qquad (10)$$

где C - инерционная емкость системы и определяется как

$$C = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{A_i}. \qquad (11)$$

Потери энергии в общем случае можно определить в виде

$$h_L = \xi_c \frac{V^2}{2g}, \qquad (12)$$

где ξ_c - коэффициент сопротивления системы, который зависит от местных сопротивлений и сопротивлений вдоль трубопровода, причем

$$\xi_c = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \frac{L_i}{d_i}\left(\frac{A}{A_i}\right)^2 + \sum_{j=1}^{m} \xi_j \left(\frac{A}{A_i}\right)^2. \qquad (13)$$

Таким образом, учитывая (10) и (12), уравнение (8) можем написать

$$\frac{\alpha_0 C}{gH}\frac{dQ}{dt} + (1 + \xi_c)\frac{Q^2}{2gHA^2} - 1 = 0. \qquad (14)$$

При установившемся режиме течения при постоянном напоре уравнение (14) можно выразить

$$\frac{1 + \xi_{co}}{2gHA^2} Q_o^2 = 1, \qquad (15)$$

где ξ_{co} - коэффициент сопротивления системы при установившемся режиме течения;

Q_o - расход жидкости при таком же режиме.

Используя выражение (15), уравнение (14) можно переписать в виде

$$\frac{\alpha_0 C}{gH}\frac{dQ}{dt} - \frac{1+\xi_c}{1+\xi_{co}}\left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 - 1 = 0. \qquad (16)$$

В общем случае коэффициент $\frac{1+\xi_c}{1+\xi_{co}}$ является функцией от времени и расхода.

При решении уравнения (16), в условии ускоренного движения, за параметры установившегося движения Q_0 и ξ_{co} следует принимать расход и коэффициент сопротивления системы после окончания переходного режима движения, т.е. значения Q и ξ_c при $t \to \infty$.

При решении задач замедленного движения за параметры установившегося движения Q_0 и ξ_{co} надо принять расход и коэффициент сопротивления системы до начала переходного процесса.

Зависимость (16) можно переписать еще в таком виде

$$\frac{\alpha_0 C}{gH} Q_0 \frac{d}{dt}\left(\frac{Q}{Q}\right) - \frac{1+\xi_c}{1+\xi_{co}}\left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 - 1 = 0, \qquad (17)$$

где величину

$$\frac{\alpha_0 C}{gH} Q_0 = T$$

можно назвать постоянной времени системы.

Под постоянной времени системы понимается, по аналогии с теорией автоматического регулирования [8], время разгона системы при отсутствии самовыравнивания, т.е. при

$$\frac{1+\xi_c}{1+\xi_{co}} = 0 \quad \text{или} \quad T\frac{dQ}{dt} = Q_0. \qquad (18)$$

Решением уравнения (18) является

$$T(Q - Q_н) = Q_0 t, \qquad (19)$$

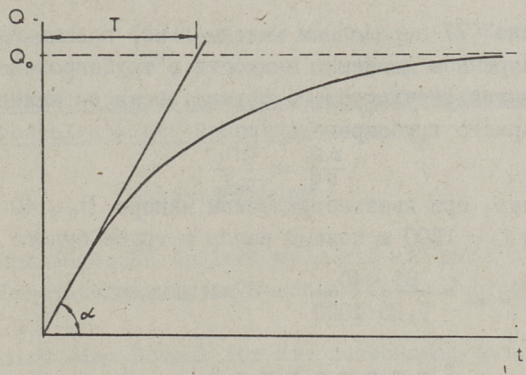
где $Q_н$ - расход системы до начала процесса.

Как следует из уравнения (18), для определения постоянной времени системы следует провести касательную к кривой регулирования $Q = f(t)$ в начальной точке и определить точку пересечения этой касательной с прямой окончательного значения (фиг. 1).

Для определения максимальной величины ускорения движения жидкости имеем из уравнения (18)

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{T} \quad \text{или} \quad \frac{dV}{dt} = \frac{gH_0}{\alpha_0 AC}, \qquad (20)$$

где H_0 - первоначальный напор в системе.



Фиг. 1. Расчетная схема для определения постоянной времени системы.

Если трубопровод имеет постоянный диаметр вдоль течения, то величину максимального ускорения можно определить по формуле

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{макс} = \frac{gH}{a_0 L}. \qquad (2I)$$

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными по формуле (2I) дается в табл. I

Таблица I

Опыт	Диаметр трубы, м	Длина трубы, м	Напор в баке, м вод.ст.	$(dV/dt)_{макс}$	
				измеренный, $м/с^2$	рассчитанный, $м/с^2$
I5-08	0,006	4,2	60	I35	I40
I5-09	0,006	4,2	60	I37	I40
I5-I0	0,006	4,2	60	I47	I40
30-I3	0,0I	4,2	60	I40	I40
30-33	0,0I	4,2	60	I38	I40
3I-02	0,0I	7,I5	60	78	82,2
3I-03	0,0I	7,I5	60	77	82,2
3I-04	0,0I	7,I5	60	80	82,2
08-I9	0,052	5I	I9	3,65	3,65
08-25	0,052	5I	I9	3,67	3,65

Как видно, расчетные данные по формуле (2I) хорошо сравниваются с максимальными ускорениями, полученными из опытов.

Согласно (7) определяем максимальное повышение давления при ускоренном движении жидкости в трубопроводе при полном открытии регулирующего органа, если он находится в начале напорного трубопровода

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{g H_0}{\alpha_0 L}.$$

Например, при пьезометрическом напоре $H_0 = 40$ м и при длине трубы $L = 1000$ м полный напор в трубе будет:

$$H_{макс} = \frac{81 \cdot 40}{1{,}05 \cdot 1000} = 37 \text{ м вод.ст.}$$

Литература

1. СНиП-31-74. Нормы проектирования. Водоснабжение, наружные сети и сооружения. Стройиздат. М., 1976.

2. Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс. Госэнергоиздат, М., 1957.

3. Каск Э.Г. Экспериментальное исследование распределения скоростей по живому сечению при возникновении движения жидкости в трубопроводе.- Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 485, 1980, с. 17-22.

4. Каск Э.Г. Изменения средней скорости в зависимости от скорости нарастания давления при неустановившемся движении жидкости в трубопроводах.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 485, 1980, с. 23-28.

5. Каск Э.Г. Определение давления нестационарного течения жидкости при заданной закономерности средней скорости в трубопроводах. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 544, 1983, с. 19-25.

6. Айтсам П.М., Паальль Л.Л., Лийв У.Р. Расчет неустановившегося напорного движения несжимаемой жидкости в жестких цилиндрических трубопроводах.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1965, № 223, с. 3-19.

7. Каск Э.Г. Потери механической энергии при периодическом движении жидкости в напорной трубе. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1979, № 472, с. 17-23.

8. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. М., Машгиз, 1958.

E. Kask, L. Paal

Die Bestimmung der maximalen Drucksteigerung im beschleunigten Rohrstrom

Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wird die Methodik zur Berechnung der Drucksteigerung im beschleunigten Rohrstrom betrachtet.

Es wird eine Formel für die Berechnung der Drucksteigerung dargelegt. Die Berechnungsresultate werden mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

№ 569
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.5I7.4

Э.Г. Каск, Т.А. Коппель

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАЗГОНА ЖИДКОСТИ С ПОПЛАВКОМ В КОРОТКОЙ ТРУБЕ

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования разгона жидкости с поплавком в короткой трубе. Процессы, связанные со взаимодействием поплавка и жидкости, рассматривались при помощи визуализации.

Введение

В последнее время в научной литературе все чаще можно найти работы, посвященные проблемам течения жидкости в цилиндрических трубах вместе с различными твердыми телами, а также работы, относящиеся к контейнерному транспорту и течения жидкости в близости поршня [I].

Задачей данного исследования было выяснить, какие процессы имеют место при разгоне жидкости вместе с поплавком, который имеет отверстие в центре, в короткой трубе. Основное внимание было уделено именно на рассмотрение течения вблизи отверстия поплавка при помощи визуализации течения.

Поток жидкости визуализировался лазерным лучом и процессы внутри жидкости снимались скоростной съемкой на кинопленку.

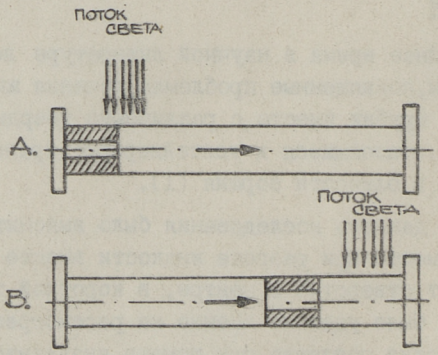
Опытная установка, на которой было проведено данное исследование, использовалась авторами уже раньше при исследовании разгона жидкости без поплавка [2]. Выяснились возможности исследовать внутреннюю структуру потока. Нужно отметить, что при относительно медленных процессах (ускорение маленькое) качество полученных результатов визуализации лучше. Обработка снятых фильмов безусловно трудоемкая работа, но в результате получаем хорошее представление, что именно происходит внутри течения, и на основе этого возмож-

ность планировать дальнейшие эксперименты с другими методами измерений.

Экспериментальная установка

Экспериментальная часть работы проведена в лаборатории гидравлики ТПИ. Опытная установка описана в предыдущей работе авторов [2].

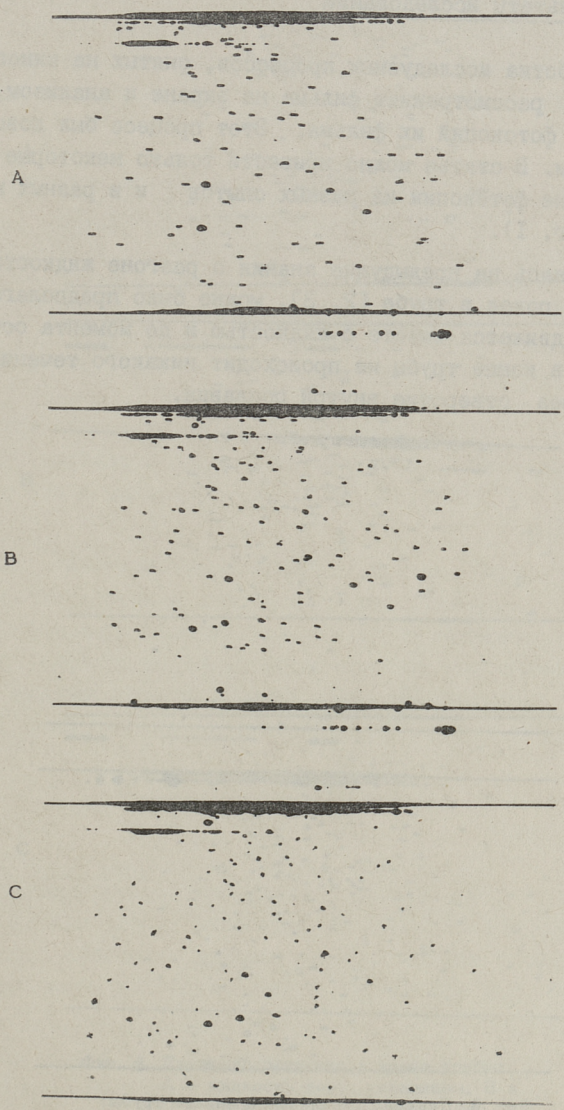
Внутри прозрачной части трубы движется поплавок вместе с жидкостью. Плотность поплавка равняется плотностью жидкости, которой является вода. Поплавок имеет следующие размеры: длина 48 мм, наружный диаметр 28 мм (внутренний диаметр трубы 30 мм) и диаметр отверстия в центре 8 мм. Схематическое изображение исследований разгона жидкости приведено на фиг. I.



Фиг. 1. Схема визуализации течения.

По сравнению с предыдущей работой следует отметить, что была улучшена схема визуализации, т.е. оптическая часть установки визуализации, а также повышена мощность лазера ЛГН-503 до 3 Вт с применением нового активного элемента.

Визуализация вместе со скоростной съемкой разгона поплавка была проведена в двух сечениях прозрачной трубы: А - в начале трубы и В - в конце трубы (фиг. I). Таким образом проведенными экспериментами можно было рассмотреть взаимодействие жидкости и поплавка впереди и после поплавка. Опыты были проведены при начальном давлении в напорном баке 49,0 кПа и 98,I кПа.

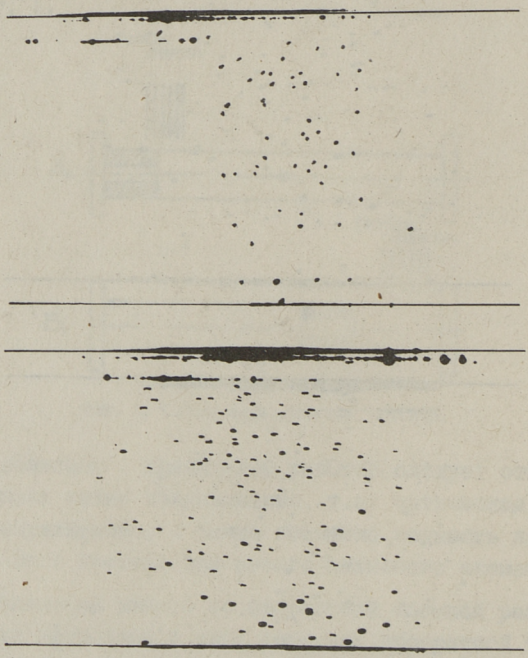


Фиг. 2. Торможение жидкости после остановки поплавка в конце трубы (фиг. 1 – поток света по схеме А).

Результаты исследований

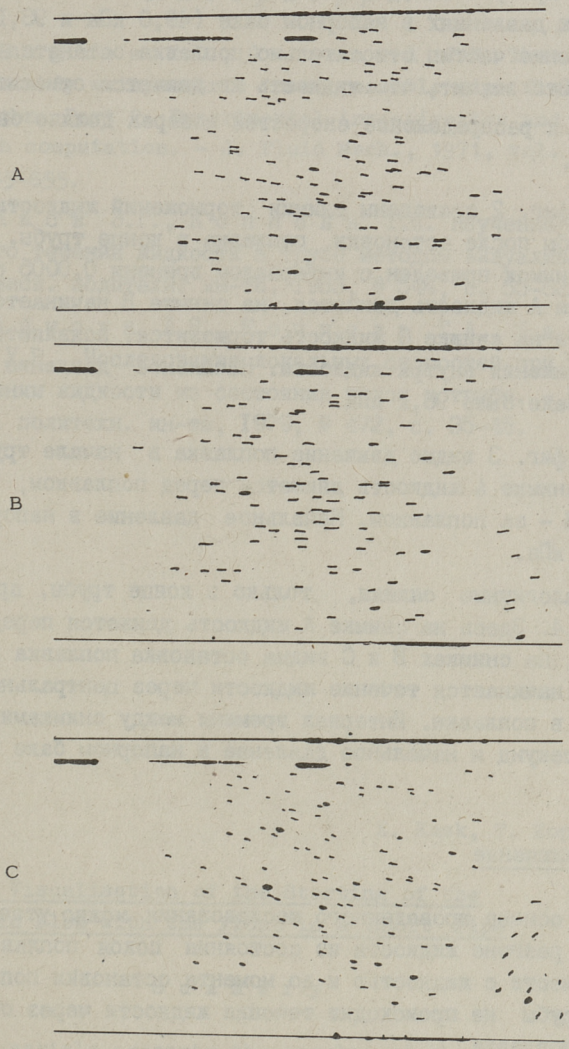
Обработка исследуемых процессов, снятых на кинопленку, произошла рассмотрением фильма на экране и анализом изготовленных фотокопий их фильма. Этот процесс был довольно трудоемким. В статье можно привести только некоторые более характерные фотокопии из разных опытов и в разных местах трубы (фиг. I).

Опираясь на предыдущие знания о разгоне жидкости из состояния покоя в трубе [2, 3], можно было предполагать, что поплавок движется вместе с жидкостью и до момента остановки поплавка в конце трубы не происходит никакого течения жидкости через отверстие внутри поплавка.



Фиг. 3. Движение поплавка в начале трубы: A – жидкость перед поплавком, B – жидкость за поплавком (фиг. 1 – поток света по схеме A).

Эту гипотезу эксперименты подтвердили. Рассматривая расположение отдельных частиц внутри жидкости относительно



Фиг. 4. Движение поплавка в конце трубы:
A – жидкость перед поплавком, B и C – жидкость за поплавком (фиг. 1 – поток света по схеме B).

поплавка при разгоне, оказывается, что при использованных начальных давлениях в напорном баке (49,0 кПа и 98,I кПа) расположение частиц относительно поплавка останется неизменным. Это значит, что жидкость не движется относительно поплавка и распределение скоростей поперек должно быть равномерным.

На фиг. 2 приведены снимки торможений жидкости в начале трубы после остановки поплавка в конце трубы. Здесь каждый снимок приведен с интервалом времени 0,0005 секунды. На снимке А жидкость движется, на снимке В начинается торможение и на снимке С жидкость тормозится, появляются вихревые движения внутри жидкости. Начальное давление в напорном баке было 98,I кПа.

На фиг. 3 видно движение поплавка в начале трубы, притом на снимке А жидкость движется перед поплавком, а на снимке В - за поплавком. Начальное давление в напорном баке 49,0 кПа.

Аналогичные снимки, только в конце трубы, приведены на фиг. 4. Здесь на снимке А жидкость движется перед поплавком, на снимках В и С видна остановка поплавка в конце трубы и начинается течение жидкости через центральное отверстие в поплавке. Интервал времени между снимками В и С 0,0005 секунд и начальное давление в напорном баке 98,I кПа.

Заключение

На основе проведенного исследования можно утверждать что при разгоне жидкости из состояния покоя поплавок движется вместе с жидкостью и до момента остановки поплавка в конце трубы не происходит течения жидкости через отверстие внутри поплавка.

Литература

1. Hughes M.D., Gerrard J.H. The stability of unsteady axisymmetric incompressible pipe flow close to a piston. Part 2. Experimental investigation and comparsion with computation. - J. Fluid Mech., 1971, vol. 50, 4, p. 645-655.

2. Каск Э.Г., Коппель Т.А. Изучение нестационарного течения жидкости в трубе методом визуализации. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1983, № 544, с. 55-62.

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

E. Kask, T. Koppel

The Visualisation of the Starting of the Fluid Flow with the Float in a Short Pipe

Summary

The article presents the results of the investigation of starting fluid flow in a short pipe. The results of the visualisation are indicating that there are not any flow through the hole in the float before the stop of the float.

№ 569

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.54.013.2

Л.Я. Айнола, У.Р. Лийв

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПРИ УСКОРЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ В ТРУБАХ

Исследование изменения величины коэффициента гидравлического трения при нестационарных движениях жидкости в цилиндрических трубах рассматривалось в нескольких работах. При этом наиболее обстоятельно исследовано периодическое ламинарное движение несжимаемой жидкости: распределение касательных напряжений и значения коэффициента гидравлического трения в зависимости от частоты колебания жидкости рассматривались в работах [1-5]. Исследованию гидравлического трения в трубах при переходных процессах, в ламинарном режиме течения посвящены работы [3, 6-12, 13-18]. Турбулентные режимы при нестационарных движениях рассматривались в работах [6, 18-23]. В этих работах модельной задачей является течение в трубе при внезапном изменении давления от одной постоянной величины к другой. При этом среднее ускорение в процессе движения изменяется.

В настоящей работе рассматривается модельная задача, где в переходном режиме движения среднее ускорение является постоянным. Исследуется изменение коэффициента трения, зависящего от ускорения, для двух случаев: при разгонном движении жидкости из состояния покоя и в случае, если движение в начальный момент нестационарного процесса является стационарным.

1. Нестационарное течение в цилиндрической трубе при постоянном среднем ускорении

Рассмотрим ламинарное нестационарное движение несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе, которое описывается уравнением

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

где v - локальная скорость в направлении оси трубы;
x, r - координаты в направлении оси и радиуса трубы;
t - время;
p - давление;
ν - коэффициент кинематической вязкости;
ρ - плотность жидкости.

Введем безразмерные величины по формулам

$$\eta = \frac{r}{R}, \quad \tau = \frac{\nu t}{R^2}, \quad u = \frac{v}{W}, \quad q = \frac{R^2}{\nu\rho W}\frac{\partial p}{\partial x}, \qquad (I.2)$$

где R - радиус трубы;
W - нормирующая скорость.

В безразмерных переменных уравнение (I.I) получает вид

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta}\frac{\partial u}{\partial \eta}\right) = -q(\tau). \qquad (I.3)$$

Средняя по сечению скорость

$$V = \frac{2}{R^2}\int_0^R v r\,dr \qquad (I.4)$$

выражается при помощи безразмерных величин в виде

$$V = wU, \qquad (I.5)$$

где

$$U = 2\int_0^1 u\eta\,d\eta \qquad (I.6)$$

и среднее по сечению ускорение

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2}{R^2}\int_0^R \frac{\partial v}{\partial t} r\,dr \qquad (I.7)$$

в виде

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\nu}{R^2} W \frac{dU}{d\tau}. \qquad (I.8)$$

Касательное напряжение

$$\tau_0 = -\mu\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_{r=R} \qquad (I.9)$$

и коэффициент местного трения ζ, который определяется равенством

$$\tau_0 = \frac{\zeta \rho v^2}{8}, \qquad (I.10)$$

выражаются через безразмерные величины равенствами

$$\tau_0 = -\mu \frac{W}{R}\left(\frac{\partial u}{\partial \eta}\right)_{\eta=1} \tag{I.II}$$

$$\zeta = -\frac{16}{Re}\frac{\left(\frac{\partial u}{\partial \eta}\right)\eta=1}{U^2}, \tag{I.I2}$$

где

$$Re = \frac{2WR}{\nu}. \tag{I.I3}$$

Решая уравнение (I.I), касательное напряжение можно представить в силе [I0]

$$\tau_0 = \frac{4\mu}{R}V + \frac{2\mu}{R}\int_0^t \frac{dV(t_1)}{dt_1} W(t-t_1)\,dt_1, \tag{I.I4}$$

где

$$W(t) = \sum_{\kappa=1}^{\infty} e^{-\frac{\nu z_\kappa^2 t}{R^2}} \tag{I.I5}$$

и z_κ – нули функции Бесселя $J_2(z)$.

Из соотношений (I.5), (I.8), (I.II), (I.I4), (I.I5) получается

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \eta}\right)_{\eta=1} = -4U - 2\int_0^\tau \frac{dU(\tau_1)}{d\tau_1} W_1(\tau-\tau_1)\,d\tau_1, \tag{I.I6}$$

где

$$W_1(\tau) = \sum_{\kappa=1}^{\infty} e^{-z_\kappa^2 \tau}. \tag{I.I7}$$

При помощи соотношений (I.I6), (I.I2) имеем

$$\zeta = \frac{64}{ReU} + \frac{32}{ReU^2}\int_0^\tau \frac{dU(\tau_1)}{d\tau_1} W_1(\tau-\tau_1)\,d\tau_1. \tag{I.I8}$$

Рассмотрим теперь случай, когда среднее ускорение постоянное

$$\frac{dU}{d\tau} = c. \tag{I.I9}$$

Тогда средняя скорость имеет вид

$$U = U_0 + c\tau, \tag{I.20}$$

где U_0 – начальная средняя скорость при $\tau = 0$.

Если учитывать соотношения (I.I9), (I.20), коэффициент местного трения (I.I8) принимает вид

$$\zeta = \frac{64}{Re(U_0+c\tau)} + \frac{32c}{Re(U_0+c\tau)^2}\,\bar{z}(\tau), \qquad (I.2I)$$

где

$$\bar{z}(\tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{z_k^2}\left(1 - e^{-z_k^2\tau}\right). \qquad (I.22)$$

2. Коэффициент местного трения при разгонном движении из состояния покоя

Рассмотрим случай разгонного движения из состояния покоя при постоянном среднем ускорении.

Обозначая через Re^* мгновенное число Рейнольдса

$$Re^* = Re(U_0+c\tau), \qquad (2.I)$$

Из соотношения (I.2I) для коэффициента местного трения получается выражение

$$\zeta = \frac{64}{Re^*} + \frac{32}{Re^*}\,\frac{c}{U_0+c\tau}\,\bar{z}(\tau). \qquad (2.2)$$

Если начальная скорость равняется нулю

$$U_0 = 0, \qquad (2.3)$$

то коэффициент местного трения выражается в виде

$$\zeta = \frac{64}{Re^*} + \frac{32}{Re^*}\,\frac{\bar{z}(\tau)}{\tau} \qquad (2.4)$$

или

$$\zeta = \frac{64}{Re^*}\,Y(\tau), \qquad (2.5)$$

где

$$Y(\tau) = 1 + \frac{z(\tau)}{2\tau}. \qquad (2.6)$$

Отметим, что в этом случае коэффициент ζ зависит только от мгновенного числа Рейнольдса Re^* и от времени τ, но явно не зависит от величины среднего ускорения C.

Если при малых значениях τ ($\tau < 0{,}02$) для функции $W(\tau)$ применять приближенное выражение [I0].

$$W(\tau) = 0{,}282055\,\tau^{-1/2} - I{,}250000 + I{,}057855\,\tau^{1/2} + \\ + 0{,}937500\,\tau + 0{,}396696\,\tau^{3/2} - 0{,}35I563\,\tau^2, \qquad (2.7)$$

то для функции $z(\tau)$ имеем

$$Z(\tau) = 0{,}564190\,\tau^{1/2} - 1{,}250000\,\tau + 0{,}705237\,\tau^{3/2} + 0{,}468750\,\tau^{2} + 0{,}158678\,\tau^{5/2} - 0{,}117188\,\tau^{3}. \qquad (2.8)$$

При $\tau > 0{,}2$ функцию $W(\tau)$ можно вычислить по первым членам ряда (I.I7) [I0]. Имеем

$$W(\tau) = e^{-26{,}3744\tau} + e^{-70{,}8493\tau} + e^{-135{,}0198\tau} + e^{-218{,}9216\tau} + e^{-322{,}5644\tau}. \qquad (2.9)$$

Соответственно получаем

$$Z(\tau) = 0{,}0379155\,(1 - e^{-26{,}3744\tau}) + 0{,}0141144\,(1 - e^{-70{,}8493\tau}) + 0{,}0074063\,(1 - e^{-135{,}0198\tau}) + 0{,}00456784\,(1 - e^{-218{,}9216\tau}) + 0{,}0031002\,(1 - e^{-322{,}5544\tau}). \qquad (2.10)$$

График функции $Y(\tau)$ приведен на фиг. I.

Значение коэффициента местного трения в зависимости от мгновенного числа Рейнольдса Re^* и времени τ изображено на фиг. 2.

3. Коэффициент местного трения при движении из стационарного состояния течения

Рассмотрим движение с постоянным ускорением в случае, когда жидкость начинает двигаться в трубе из состояния стационарного ламинарного течения.

Коэффициент местного трения по формуле (2.2) можно при $U_0 \neq 0$ представить в виде

$$\zeta = \frac{64}{Re^*}\, Y_1(\tau, C_1), \qquad (3.1)$$

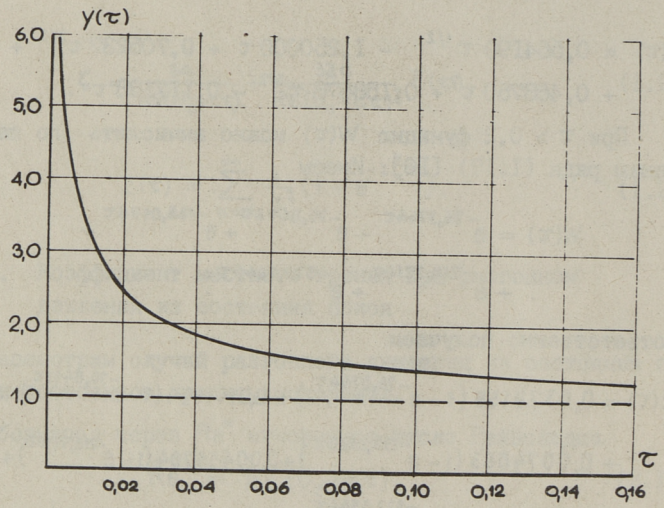
где

$$Y_1(\tau, C_1) = \frac{1 + C_1}{2(1 + C_1\tau)}\, Z(\tau) \qquad (3.2)$$

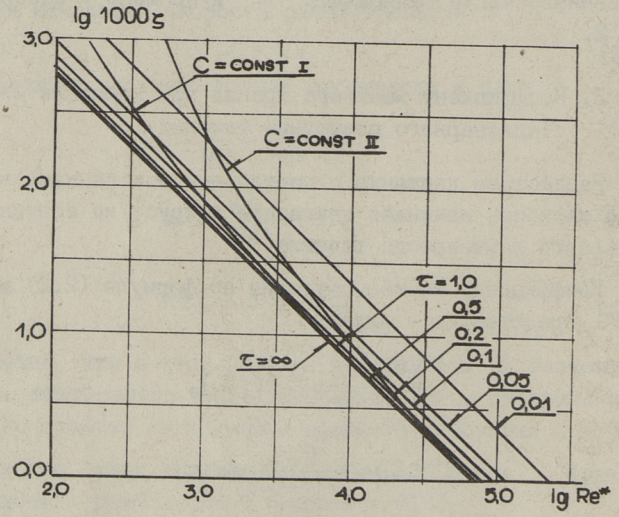
и

$$C_1 = \frac{c}{U_0}. \qquad (3.3)$$

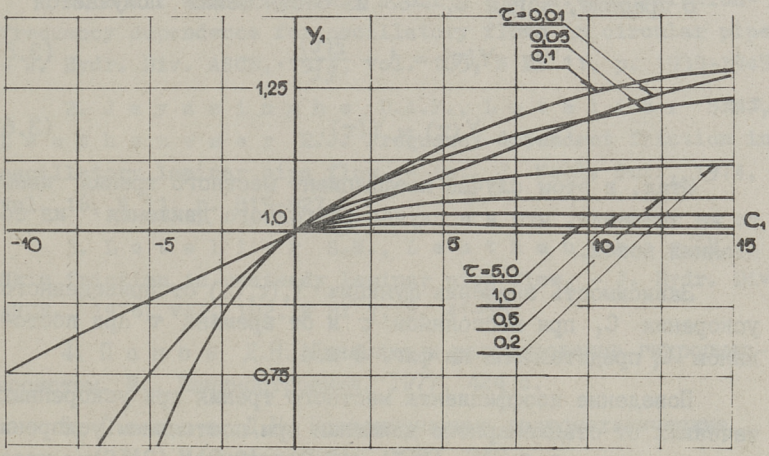
При малых значениях ускорения C_1 функцию (3.2) можно представить приблизительно в виде



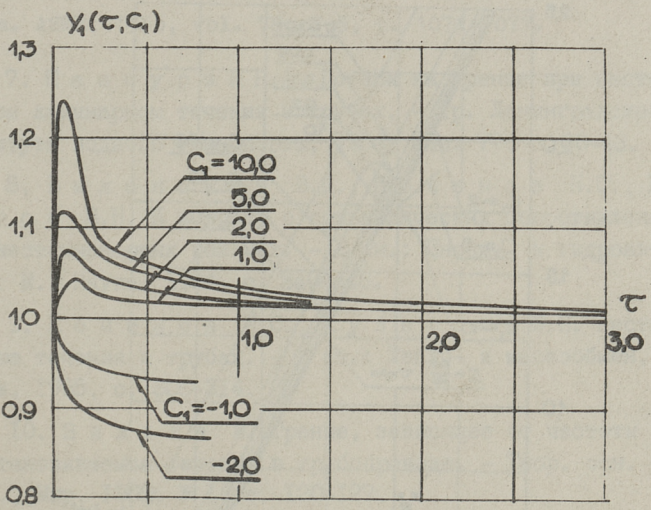
Фиг. 1. Зависимость функции $Y(\tau)$ от τ.



Фиг. 2. Зависимость $\lg(10^3\zeta) = f(\lg Re^*)$.



Фиг. 3. Зависимость функции $Y_1(\tau, C_1)$ от переменного C_1.



Фиг. 4. Зависимость функции $Y_1(\tau, C_1)$ от переменного τ.

$$Y_1(\tau, C_1) = 1 + C_1(1 - C_1\tau - \ldots)\bar{z}(\tau). \qquad (3.4)$$

В пределе, когда $C_1 \to \infty$ из соотношений получается

$$Y_1(\tau) = 1 + \frac{\bar{z}(\tau)}{2\tau}, \qquad (3.5)$$

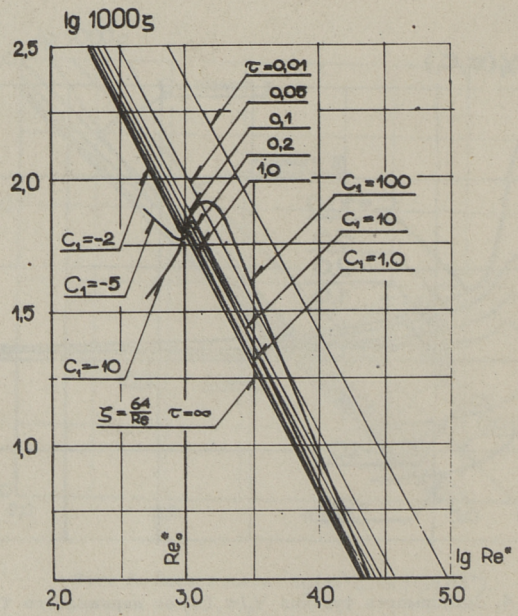
т.е.

$$Y_1(\tau) = Y(\tau). \qquad (3.6)$$

Итак, в этом случае коэффициент местного трения имеет то же значение, что и в случае разгонного движения из состояния покоя.

Зависимость значения функции $Y_1(\tau, C_1)$ от приведенного ускорения C_1 при постоянном τ и от времени τ при постоянном C_1 представлена на фиг. 3 и 4.

Поведение коэффициента местного трения при ускоренных течениях от стационарного движения при постоянном ускорении, вычисленное по формулам (3.I), (3.3), (2.8), (2.I0), представлено на фиг. 5.



Фиг. 5. Зависимость коэффициента местного трения от ускорения.

Литература

1. Safwart H.H., Polder J.V.D. Friction-frequency dependence for oscillatory flows in circular pipe. - J. Hydr. Div. ASCE, 1973, vol. 103, N HY 11, p. 1933-1945.

2. Jayasinghe D.A.P., Letelier S.M., Leutheusser H.J. Frequency-dependent friction in oscillatory laminar pipe flow. - Int. J. Mech. Sci., 1974, vol. 16, N 11, p. 819-827.

3. Letelier S.M., Leutheusser H.J. Skin friction in unsteady laminar pipe flow. - J. Hydr. Div. ASCE., 1976, vol. 102. N HY 1, p. 41-56.

4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидропневмосистем. М., Машиностроение, 1977. 424 с.

5. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М., Машиностроение, 1982. 240 с.

6. Daily J.W., Hankey W.L., Olive R.W., Jordan J.M. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. - Trans. ASME, 1956, vol. 78, N 5, p. 1071-1077.

7. Панчурин Н.А. Потери на трение при нестационарном ламинарном течении в трубах. - Тр. Ленинградского института водного транспорта, 1964, вып. 77, с. 38-43.

8. Виленский В.Д., Коченов Н.С., Кузнецов Ю.Н. К вопросу о гидравлических сопротивлениях при нестационарных режимах. - В кн.: Пневмо- и гидроавтоматика. М., Наука, 1964, с. 240-248.

9. Коченов И.С., Кузнецов Ю.Н. Нестационарные течения в трубах. - В кн.: Тепло- и массообмен, т. I. Минск, 1965, с. 306-314.

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

11. Барсегян М.Г. О коэффициенте сопротивления трения при неустановившемся движении в трубах. - Изв. АН Арм. ССР. Сер. техн. наук, 1971, т. 24, № 6, с. 10-14.

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

13. Koppel T.A., Liiv U.R. An investigation of shear stress on the wall of the pipe at the starting from rest of liquid by means of a thermoanemometer. - Dynamic Flow Conference, Abst. Marseille, France, 1978, p. 114.

14. Achard J.L., Lapinard G.M. Structure of the transient wall-friction law in one-dimensional models of laminar pipe flows. - J. Fluid Mech., 1981, vol. 113, p. 263-293.

15. Айнола Л.Я., Коппель Т.А., Лампп Ю.Ю., Лийв У.Р., Эенсалу О.О. О коэффициенте трения для ламинарных нестационарных течений в трубе. - 1981, № 505, с. 3-15.

16. Овсянников В.М. Расчет возникновения движения жидкости в трубопроводе. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1981, № 5, с. 158-160.

17. Байбаков Б.С., Орешкин О.Ф., Прудовский А.М. Сопротивление трения при ускоренном течении в трубе. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1981, № 5, с. 137-139.

18. Ainola L.J., Koppel T.A., Lamp J.J., Liiv U.R. The skin friction coefficient during accelerated flows in pipes. - Proc. XX Congr. IAHR, Moscow, 1983, vol. VI, p. 453-460.

19. Панчурин Н.А. Гидравлические сопротивления при неустановившемся турбулентном течении в трубах. - Тр. Ленинградского ин-та водного транспорта, 1961, вып. 13, с. 43-56.

20. Денисов С.В. О коэффициенте трения в нестационарных течениях. - Инж.-физ. ж., 1970, т. 18, № 1, с. 118-123.

21. Марков С.Б. Экспериментальное исследование скоростной структуры и гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных турбулентных потоках. - Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 2, с. 55-61.

22. Букреев В.И., Шахин В.М. Экспериментальное исследование энергии турбулентности при неустановившемся течении в трубе. - В кн.: Математические вопросы механики. Новосибирск, 1975.

23. Лийв У.Р. Экспериментальное исследование ускоренного переходного течения в трубах. - Изв. АН СССР. Водные ресурсы, 1981, № 3, с. 139-145.

L. Ainola, U. Liiv

About the Friction Coefficient of the Accelerated Flows in Pipes

Summary

In the present paper the problem of determining friction coefficient during laminar unsteady flow in round pipes is viewed. The friction coefficient is investigated under the action of the constant acceleration for two models: for the case when the flow starts from rest and for the case when the flow is steady at the initial moment.

№ 569
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 532.54.013.2

У.Р. Лийв

К РАСЧЕТУ ТУРБУЛЕНТНЫХ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ДВИЖЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

К настоящему времени в свет появилось множество работ, в которых, исходя из основных уравнений гидродинамики, дается замкнутое описание многих прикладных задач, возникающих при турбулентных стационарных течениях жидкости. При этом результаты численных расчетов или соответствующих аналитических решений обладают достаточной точностью для большого круга задач. Последние достижения в этой области описаны в [1, 2, 3]. Значительно хуже положение с расчетами нестационарных турбулентных потоков: здесь имеется только несколько статей [4–8, 10], в которых рассматриваются вопросы дифференциальных уравнений, описывающие нестационарные турбулентные течения и способы замыкания этих уравнений с целью последующего численного расчета. Из этих работ выясняется, что для замыкания уравнений, описывающих нестационарные течения, используются коэффициенты, которые получены из экспериментов и предназначены для расчетов стационарных турбулентных потоков. Следовательно, при замыкании уравнений неустановившихся движений пренебрегают влиянием локальных сил инерции, вызывающих значительные изменения в структуре нестационарных потоков.

1. Математическая модель, описывающая неустановившиеся турбулентные движения несжимаемой жидкости в трубах

При решении дифференциальных уравнений практических задач неустановившихся турбулентных потоков возникают трудности, которые заключаются в следующем:

1. При математической формулировке рассматриваемого неустановившегося движения по сравнению с задачами устано-

вившегося движения появляется дополнительная переменная - время. Следовательно, при выполнении численных расчетов возникают существенно повышенные требования к быстродействию ЭВМ и их оперативной памяти.

2. Как показывают результаты экспериментальных исследований [II], теория, созданная для исследования установившегося движения жидкости, не позволяет без корректировки получать приемлемые результаты в условиях неустановившегося движения. Для указанной корректировки, существующей полуэмпирической теории необходимо провести экспериментальные исследования по определению характеристик турбулентности в условиях нестационарности.

Исходными уравнениями, описывающими движение вязкой жидкости, являются уравнения Навье-Стокса

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\operatorname{grad} p + \mu \Delta \bar{v} + \frac{\mu}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{v}, \qquad (I.1)$$

где $\bar{v}$ - скорость движения жидкости;
p - давление;
μ - коэффициент динамической вязкости;
ρ - плотность жидкости.

Рассматривая, что скорость v_i состоит из усредненной части $\bar{v}_i$ и пульсационной части v_i'

$$v_i = \bar{v}_i + v_i' \qquad (I.2)$$

и подставляя (I.2) в (I.I) после осреднения полученных уравнений по правилам Рейнольдса О.Ф. Васильев и В.И. Квон [8] получили в цилиндрических координатах уравнения движения и баланса турбулентной энергии в виде

$$\frac{\partial \langle v_z \rangle}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left(\nu \frac{\partial \langle v_z \rangle}{\partial r} - \langle v_z' v_r' \rangle \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial z}, \qquad (I.3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \langle v_r' E \rangle \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \langle v_r' \frac{p'}{\rho} \rangle \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \nu \frac{\partial E}{\partial r} \right) - \langle v_z' v_r' \rangle \frac{\partial \langle v_z \rangle}{\partial r} - \nu \left(\frac{\partial \langle v_z' \rangle}{\partial r} \right)^2. \qquad (I.4)$$

Приведенные уравнения описывают неустановившееся движение жидкости в цилиндрических трубах при следующих допущениях:

I) жидкость малосжимаемая и стенки труб практически недеформируемые;

2) течение осесимметричное;

3) из всех добавочных напряжений существенное значение имеет только член $-\rho v_z' v_r'$;

4) из-за малой сжимаемости жидкости можно пренебречь членами типа $\langle v_z \rangle \frac{\partial \langle v_z \rangle}{\partial z}$ и $\frac{4}{3} \frac{\partial^2 \langle v_z \rangle}{\partial z^2}$.

В уравнениях I.3 и I.4

$$E = \frac{\langle v_z'^2 \rangle + \langle v_r'^2 \rangle + \langle v_\varphi'^2 \rangle}{2}, \qquad (I.5)$$

где v_z, v_r, v_φ - составляющие вектора скорости в цилиндрических координатах.

В работе [8], а также в [9, I0] для нестационарных течений в трубах принято, что порождение турбулентной энергии, согласно гипотезе Буссинеска, заменяется выражением через турбулентную вязкость в виде

$$-\langle v_z' v_r' \rangle \frac{\partial \langle v_z \rangle}{\partial r} = \nu_T \left(\frac{\partial \langle v_z \rangle}{\partial r} \right)^2. \qquad (I.6)$$

Диссипация турбулентной энергии в вышеуказанных работах вычислялась по предложению Колмогорова [I2]

$$\nu \left(\frac{\partial \langle v_z' \rangle}{\partial r} \right)^2 = C_1 \frac{E^{3/2}}{L}, \qquad (I.7)$$

и члены в уравнении (I.4), выражающие диффузию энергии турбулентности и давления, следуя работе Г.С. Глушко [I3], определяются суммарным выражением

$$-\frac{1}{r}\left(r \langle v_r' E \rangle\right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \langle v_r' \frac{p'}{\rho} \rangle\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \nu \frac{\partial E}{\partial r}\right) =$$

$$= \nu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left[r D(R_E) \frac{\partial E}{\partial r} \right]. \qquad (I.8)$$

В зависимостях (I.7) - (I.8) L - характерный размер больших энергосодержащих вихрей, D - суммарный коэффициент диффузии, (R_E) - турбулентное число Рейнольдса. Анализ и оценка этих величин приводятся в работах [5, 6, 8]. Из-за отсутствия экспериментальных данных турбулентных характеристик при нестационарных течениях эти величины принимают такими, как и при стационарных течениях.

В работе [I4] на основе экспериментальных данных ускоренных движений обнаружено, что распределения гидравлических характеристик, входящие в (I.6) – (I.8), отличаются от стационарных как во времени, так и в пространстве. Поэтому для создания математической модели, описывающей турбулентные неустановившиеся движения, необходимо сосредоточить внимание на экспериментальном исследовании характеристик потока, которые описывают явления, представляемые уравнениями (I.3) и (I.4).

2. Исследование ускоренных потоков

В лаборатории гидравлики Таллинского политехнического института в течение ряда лет проводятся исследования ускоренных потоков, которые показывают [I5, I6], что кинематическая структура нестационарных потоков значительно отличается от структуры стационарных потоков. Это показывают также экспериментальные данные, обработанные в универсальных полулогарифмических координатах [II].

В этих работах [II, I5, I6] приводятся данные измерения распределения скоростей и интенсивностей турбулентности ускоренных водных потоков в нержавеющей трубе диаметром 0,06I м с помощью термоанемометрических датчиков.

На этой же установке проведено экспериментальное исследование корреляции $-\rho\langle v_z' v_r'\rangle$ – представляющей рейнольдсовые напряжения. Для этих целей использовался стандартный двухпленочный термоанемометрический датчик 55R72 вместе со стандартными усилительными каналами фирмы "ДИСА". Обработка экспериментальных данных проводилась по методу ансамбля, причем количество опытов в ансамбле составляет не менее 20. Самая близкая к стенке опытная точка находится на относительном радиусе $r/R = 0{,}87$, которая определялась габаритными размерами датчика 55R72.

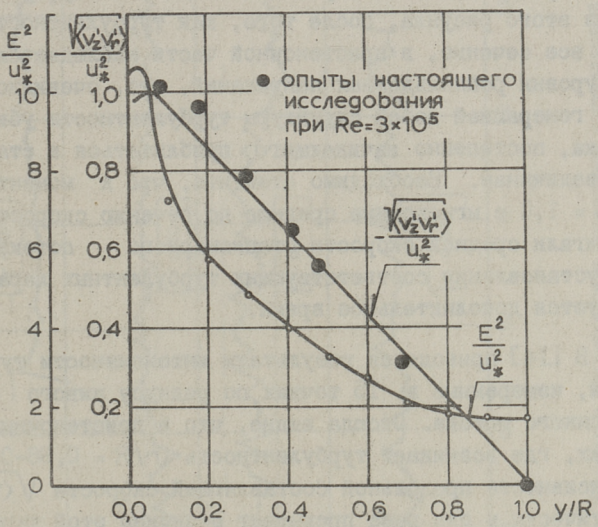
Первая серия опытов[x] проведена с целью сравнения опытной установки и применяемой методики с "классическими" экс-

---

[x] Экспериментальные опыты выполнены под руководством к.т.н. Т.А. Кошеля.

периментальными данными Лауфера [17] при стационарном режиме и представляется в безразмерном виде.

Указанные опыты проводились в сечении, расположенном на расстоянии 150 d от входа в трубу при числе $Re = 3 \times 10^5$. Как видно, измеренные значения корреляции $-\langle v_z' v_r' \rangle$, отнесенные к измеренным величинам динамической скорости u_*, достаточно хорошо согласуются (фиг. I) с данными Лауфера и поэтому принятую методику экспериментального исследования можно признать удовлетворительной.



1. Сравнение экспериментальных данных корреляции $-\langle v_z' v_r' \rangle$ с экспериментальными данными Лауфера [17].

Вторая серия настоящего исследования относится к опытам частного случая ускоренного движения - возникновению движения жидкости из состояния покоя. При этом ускоренный период разделяется на три характерные случая [4]: ламинарный режим, смена режимов и турбулентный режим. Экспериментальными данными доказано, что потеря устойчивости и возникновение турбулентности происходит в пристеночной области, а распространение турбулентности по сечению по ли-

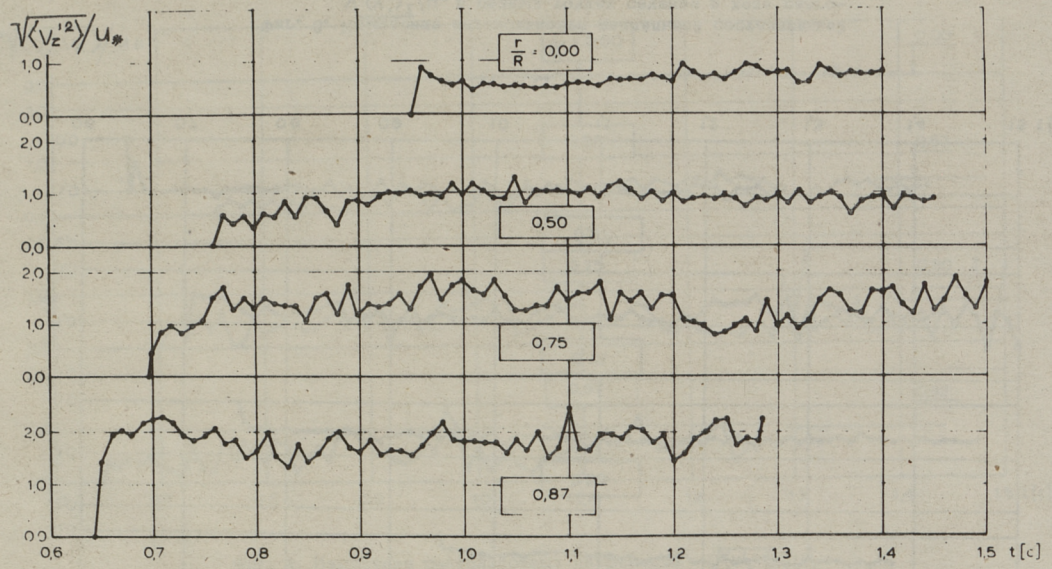
нейному закону. По указанному линейному закону происходит также возникновение и распространение по сечению рейнольдсовых напряжений. Подтверждением сказанного являются приводимые на фиг. 2-4 обработанные экспериментальные данные безразмерных величин интенсивности продольной составляющей $\sqrt{\langle v_z'\rangle^2}/u_*$, радиальной составляющей $\sqrt{\langle v_r'\rangle^2}/u_*$ и рейнольдсовых напряжений $\sqrt{\langle v_z' v_r'\rangle}/u_*^2$, измеренные в четырех точках по радиусу с помощью двухпленочного датчика 55R72 в ходе разгона.

На фиг. 4 в правом краю рисунка представлены величины уровня рейнольдсовых напряжений по данным Лауфера. Как видно из этого рисунка, после того, как турбулентностью охвачено все сечение, в пристеночной части наблюдается понижение уровня рейнольдсовых напряжений, что, очевидно, связано с генерацией новой структуры турбулентности ускоренного потока, постепенно начинающего приближаться к стационарным величинам. Необходимо отметить, что к моменту времени $t = 1{,}0$ с мгновенные средние по сечению скорости уже достигали средней скорости стационарного потока, однако для установления соответствующих турбулентных характеристик требуется дополнительное время.

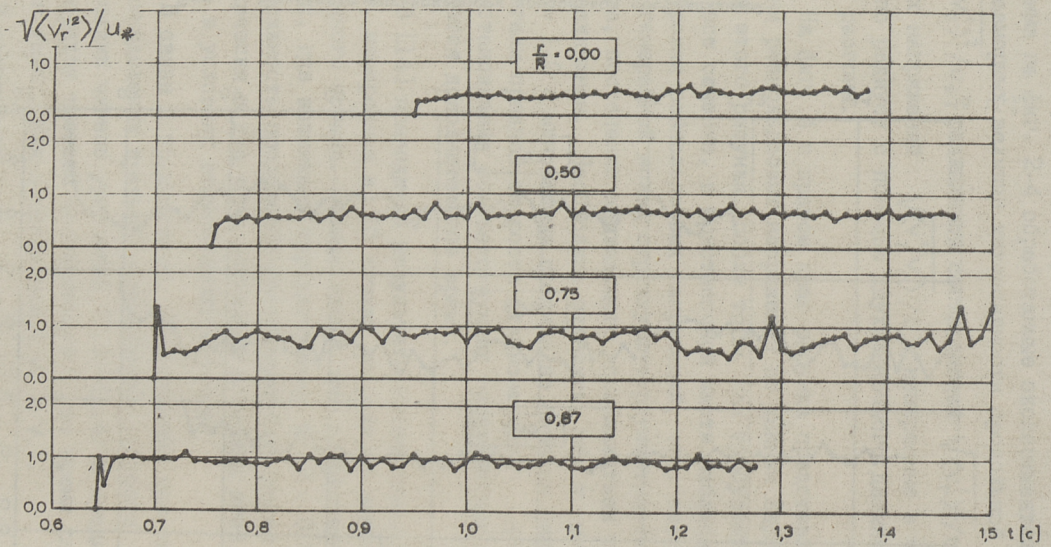
В [14] приводятся результаты интенсивности турбулентности, измеренные в 15 точках по радиусу живого сечения разгонного потока. Отсюда видно, что в пристеночных регионах, где возникает турбулентность ($r/R = 0{,}98$-$0{,}94$), интенсивность продольной составляющей скорости $\sqrt{\langle v_z'\rangle^2}/u_*$ практически в два раза превышает величины этой характеристики в условиях стационарных потоков.

В связи с трудностями, возникающими при экспериментальном определении третьей составляющей скорости v_φ, произведен анализ членов уравнений (I.3)-(I.4) в предположении, что порядок третьей составляющей v_φ во время разгона изменяется также, как и остальные (v_z и v_r).

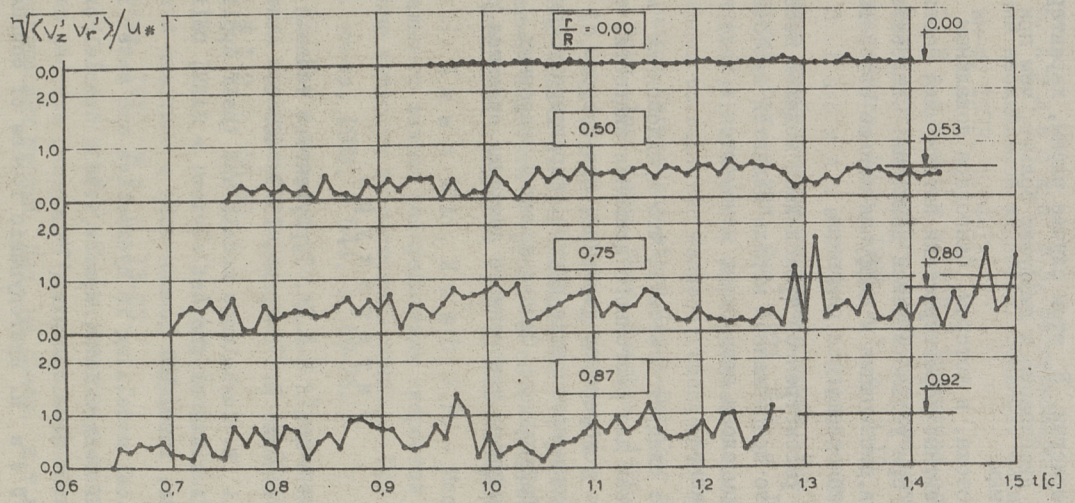
В результате этого анализа на основе полученных экспериментальных данных для ускоренных турбулентных потоков в цилиндрических трубах можно предложить трехслойную модель движения жидкости:



Фиг. 2. Изменение интенсивности продольной составляющей $\sqrt{\langle v_z' \rangle^2}/u_*$ в разных точках сечения в ходе разгона жидкости.



Фиг. 3. Изменение интенсивности радиальной составляющей $\sqrt{\langle v_r' \rangle^2}/u_*$ в разных точках сечения в ходе разгона жидкости.



Фиг. 4. Изменение рейнольдсовых напряжений $-\sqrt{\langle v_z' v_r' \rangle}/u_*^2$ в разных точках в ходе разгона жидкости.

I. Вязкий подслой.

2. Пристенная область, характеризующаяся большей по сравнению с установившимся движением интенсивностью турбулентных характеристик. В этом случае члены, характеризующие генерацию, диссипацию и диффузию больше, чем при установившемся движении.

3. Ядро потока, в котором, благодаря локальным силам инерции, турбулентные характеристики потока ниже соответствующих величин при установившемся движении. Следовательно, здесь генерация, диссипация и диффузия меньше соответствующих величин установившегося движения.

В связи с рассмотренной трехслойной моделью необходимо отметить, что предложенная модель является качественной, при этом границы слоев несомненно изменяются в ходе нестационарного движения.

Кроме того следует отметить, что предложенная модель действительна как для разгонного движения жидкости, так и для переходного ускоренного движения, при котором один стационарный режим заменяется другим, характеризующимся высоким числом Рейнольдса. Однако толщины указанных слоев для этих двух случаев ускоренного движения являются разными.

Литература

I. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. М., Энергия, 1979. 408 с.

2. Rodi W. Turbulence models and their application in hydralics. A state of the art review. - IAHR, Delft, The Netherlands, 1980. 108 p.

3. Numerical modelling in hydraulics and water resourses. - Proc. XX Congr. IAHR, Moscow, 1983. Special presentations of recent developments. 114 p.

4. Toebes H. Hydrodynamic forces of boundaries due to unsteady flow. - Proc. XIII Congr. IAHR, Paris, 1971. General reports, p. 59-74.

5. Константинов С.В. Замкнутое описание неустановившегося турбулентного течения реальной жидкости в трубе. Моск. ин-т. нефтехим. и газ. пром-сти им. И.М. Губкина. М., 1976, с. 1-10.

6. Худаско В.В. Нестационарное турбулентное течение несжимаемой жидкости. Обнинск. Физико-энергетический ин-т, 1973, с. 4-17.

7. Еременко Е.В. Замкнутое описание движения открытого нестационарного турбулентного потока.-Гидравлика и гидротехника, Киев, 1968, № 7, с. 3-10.

8. Васильев О.Ф., Квон В.И. Неустановившееся турбулентное течение в трубе. Изв. АН СССР, Журнал прикл. мех. и тех. физ. 1971, № 6, с. 132-140.

9. Kirmse R. Experimentelle Untersuchungen pulsierender turbulenter Wasserströmungen in geraden Kreisrohr unter Verwendung eines Laser-Doppler Anemometers. Diss. Dokt. Ing. Tech. Univ. München, 1976. 110 S.

10. Квон В.И., Чернышева Р.Т. Численное решение задачи о неустановившемся турбулентном течении несжимаемой жидкости в трубе.- В сб.: Численные методы механики сплошной среды, т. 7, № 2. Новосибирск, 1976, с. 32-43.

11. Ламп Ю.Ю., Лийв У.Р. - Исследование универсального закона распределения скоростей в трубах при разгоне жидкости из состояния покоя. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1983, № 544, с. 69-76.

12. Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1942, № 1-2, с. 56-58.

13. Глушко Г.С. Турбулентный пограничный слой на плоской пластине в несжимаемой жидкости. - Изв. АН СССР. Механика, 1965, № 4, с. 13-23.

14. Лийв У.Р. Теоретические и экспериментальные основы расчета напорного ускоренного движения жидкости в цилиндрических трубах. Дис. на соиск. д.т.н., Таллин, 1983. 300 с.

15. Ainola L.J., Koppel T.A., Lamp J.J., Liiv U.R. The skin friction coefficient during accele-

rated flows in pipes. - Proc. XX Congr. IAHR, Moscow, 1983, vol. VI, sub. C, p. 453-460.

I6. Л и й в У.Р. Экспериментальное исследование ускоренного переходного течения в трубах. - Изв. АН СССР, Водные ресурсы, № 3, I98I, с. I39-I45.

17. L a u f e r J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. - NACA Rep., 1954, N 1174, p.1-18.

U. Liiv

Mathematical Modelling of a Turbulent Unsteady Flow in Pipes

S u m m a r y

In the paper the problems of closing the equations of motion and pulsatile turbulent energy describing the unsteady motions in pipes are examined. On the basis of the experimental data of the pulsatile characteristics of unsteady turbulent flows a three-layer model is recommended. The model is created analyzing the terms of the equations taking into account the diffusion, dissipation and generation of pulsatile energy of turbulent unsteady flows.

№ 569

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.16

Я.Я. Кару

УЛУЧШЕНИЕ РАБОТЫ КОНТАКТНЫХ ОСВЕТЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с тем, что контактные осветлители позволяют получить воду питьевого качества по одноступенчатой схеме водоподготовки, вопросы эффективности и надежности их работы имеют особое значение.

В настоящей статье приводятся результаты исследований, связанные с изучением и улучшением работы контактных осветлителей на Нарвской водоочистной станции. Станция получает исходную воду из р. Нарвы по водоводу протяженностью 26 км. В периоды, когда требуется коагулирование, мутность исходной воды, как правило, не превышает 10-15 мг/л, цветность $< 80^{\circ}$ Pt - Co, щелочность $\approx$ 1-2,5 мг-экв/л, ХПК $\approx$ 20-30 мг O_2/л. На водоочистной станции установлены безгравийные контактные осветлители с водяной промывкой и трубчатой дренажной системой, предварительная очистка воды происходит в микрофильтрах. Водных камер и усреднения воды перед очисткой нет, исходная вода поступает из водовода прямо в аванкамеру микрофильтров, смесители перегородчатые с подачей первичного хлора и коагулянта (очищенный сернокислый глинозем) - в первую секцию. Регуляторы скорости отсутствуют, нет возможности фиксировать потерю напора в загрузке.

Несмотря на относительно благоприятные свойства исходной воды, эффективность контактных осветлителей низка, фильтроцикл короткий, расход промывной воды большой.

На первом этапе работ изучалось соответствие загрузки контактных осветлителей СНиП-у и техническим указаниям [1]. Для этого во время промывки из разных точек поверхности фильтров и из разных глубин брались анализы фильтрующего материала, для которых определяли гранулометрические показате-

ли и химическую стойкость. Выяснилось, что эквивалентный диаметр песка находится в пределах I,I-I,4 мм, что соответствует требованиям нормативных источников. Вместе с тем укладка фракций материала по площади фильтров неодинаковая, в углах имеются плохо промываемые участки, поверхность загрузки неровная. Причиной тому является нарушение требования послойной укладки материала при загрузке, а также неудовлетворительная работа дренажа. Как оказалось, в некоторых распределительных трубах дренажной системы образовались крупные дырки в результате коррозии, вызванной высокими дозами первичного хлора.

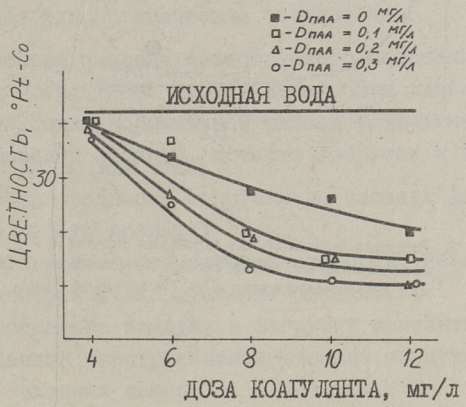
Определение химической стойкости показало, что прирост окисляемости в щелочной среде и особенно сухого остатка в щелочной, кислой и нейтральной средах превышает норму. Видимо это объясняется постепенным накапливанием вокруг песка трудносмываемого осадка в результате неудовлетворительной промывки фильтров.

Наряду с анализами песка был изучен эксплуатационный режим контактного осветлителя в течение фильтроцикла. Для этого фильтр был оборудован пьезометрами, присоединенными к пьезометрическому щиту опытной установки. Ежечасно брались анализы фильтрата для определения мутности и цветности. Скорость фильтрования и доза коагулянта регистрировались по данным диспетчерской службы и лабораторий станции.

Опыт показал, что скорость фильтрования контактного осветлителя может ввиду принятого на станции режима эксплуатаций изменяться в течение фильтроцикла 50 % и более. Прерывистое коагулирование исходной воды создает дополнительные затруднения в поддержании необходимого качества фильтрата, особенно по цветности. Потеря напора фильтра, зарегистрированная пьезометрами, плохо коррелируется с данными диспетчерской службы о принятых в течение фильтроцикла эксплуатационных изменениях. Это свидетельствует о неполном соответствии имеющейся информации к реальной картине работы фильтров.

Для поиска оптимальных условий реагентной обработки исходной воды проводились лабораторные исследования с определением хлоропоглощаемости воды, оптимальных доз коагулянта и полиакриламида, а также оптимального времени контакта реагентов с водой.

Анализы выполнялись с использованием стеклянной бутылки емкостью I л, причем необходимое время контакта выдерживали повторяющимся опрокидыванием бутылки в течение заданного времени. Затем вода с помощью водоструйного насоса фильтровалась через двухслойный бумажный фильтр типа "синяя лента". Качество фильтрата оценивалось колориметром по оптической плотности, а также цветностью по платино-кобальтовой шкале.

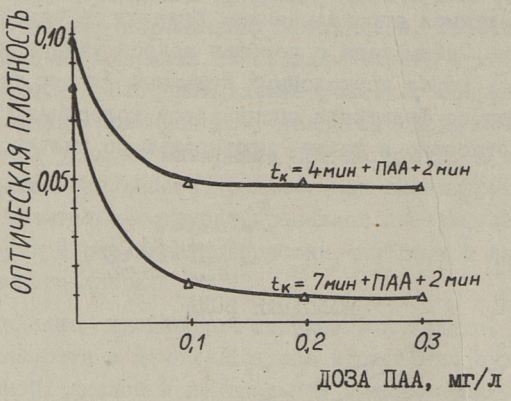


Фиг. 1. Определение оптимальной дозы коагулянта с использованием ПАА при времени контакта коагулянта $t_к$ = 4 мин и $t_{ПАА}$ = 2 мин.

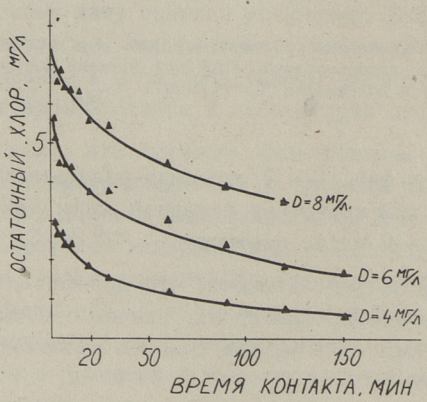
На графиках фиг. I и 2 отражены результаты опытов 20-24.IУ. I98I г. при свойствах исходной воды: температура - 4 °С, мутность - 2 мг/л, цветность - 42° Pt-Co.

По графику на фиг. I видно, что применение ПАА позволяет улучшить качество фильтрата, причем с повышением его дозы от 0,I до 0,3 мг/л эффект очистки несколько повышается.

На основе графиков на фиг. 2 можно прийти к выводу, что с повышением времени контакта коагулянта $t_к > 4$ мин эффективность осветления увеличивается. Характерно, что в разные периоды были в этом отношении получены разные результаты, причем существенное влияние оказало применение ПАА. Это говорит о необходимости периодического пробного коагулирования воды.



Фиг. 2. Влияние дозы ПАА и времени контакта коагулянта на эффективность осветления при дозе коагулянта D = 10 мг/л по Al_2O_3.



Фиг. 3. Хлоропоглощаемость исходной воды при разных дозах хлора.

На фиг. 3 приведены графики хлоропоглощаемости исходной воды в период 23-24.XI.1981 г. (температура воды - 2 °С, мутность - 13 мг/л, цветность - 60° Pt-Co). Отсюда видно, что применяемые на станции дозы первичного хлора - 6-7 мг/л неоправданно высокие, хотя этим в определенной степени компенсируются недостатки в работе контактных осветлителей. Повышенные дозы первичного хлора обуславливают интенсивную коррозию дренажных труб, создают трудности в соблюдении требований ГОСТ по остаточному хлору, образуют в воде хлорорганические соединения.

На основе анализа существующего положения и по результатам проведенных исследований были выявлены основные причины неудовлетворительной работы контактных осветлителей на Нарвской станции, которые сводятся к следующему:

1) неоднородность загрузки по площади фильтров и неполадки в работе дренажа;

2) отсутствие регуляторов скорости, неравномерный гидравлический режим эксплуатации станции;

3) попадание воздуха в загрузку контактных осветлителей, неудачное конструктивное решение воздухоудаления, отсутствие входных камер;

4) не отработан оптимальный режим реагентной обработки исходной воды, неудовлетворительное смешивание реагентов с водой.

Для улучшения положения были рекомендованы следующие мероприятия:

1) заменить в одном контактном осветлителе верхний слой 20 см на отсеянную фракцию песка 0,5-0,7 мм. После проверки эффективности данного решения в производственных условиях заменить верхние слои в остальных фильтрах;

2) при замене проржавевшихся дренажных труб установить в фильтры поддерживающие гравийные слои, руководствуясь при этом требованиями технических указаний [1];

3) принять все меры для защиты фильтров от попадания туда воздуха;

4) оборудовать по крайней мере один контактный осветлитель регулятором скорости и приборами для регистрации потери напора в загрузке;

5) внедрить на станции режим работы контактных осветлителей с постоянной скоростью фильтрования, принимая во внимание график водопотребления города и объем регулирующих емкостей, исключить возможность резкого повышения скорости фильтрования в результате включения насосов I-го подъема;

6) в лаборатории станции внедрить периодическое экспериментальное определение оптимальных доз реагентов, внедрить применение полиакриламида;

7) при условии выполнения приведенных рекомендаций в целях защиты распределительных труб дренажной системы от коррозий и предотвращения образования в питьевой воде хлорорганических соединений уменьшить дозу первичного хлора с дополнительной подачей хлора в резервуар чистой воды до требуемых ГОСТ норм. Конкретные дозы хлора, как и других реагентов, определить на основе результатов периодических лабораторных опытов.

Литература

I. Технические указания на проектирование, строительство и эксплуатацию контактных осветлителей для очистки воды. ОНТИ АКХ. М., 1977.

J. Karu

Improvement of the Working Parameters of the Direct Filtration Installations on the Basis of the Laboratory and Natural Investigations

Summary

Some natural and laboratory investigations are made to improve the working parameters of the direct filtration installations. The article gives some recommendations for the improvement of the quality of purified water.

№ 569
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
УДК 628.191:628.54

Ю.Я. Сяэрекынно

К ВОПРОСУ НОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ С УЧЕТОМ АДДИТИВНОСТИ ВРЕДНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ОДИНАКОВЫМ ЛИМИТИРУЮЩИМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ВРЕДНОСТИ (ЛПВ)

По требованиям Правил [1] (п. 21 и 27) при поступлении в водные объекты нескольких загрязняющих веществ с одинаковым ЛПВ, сумма отношений этих концентраций ($C_1, C_2, \ldots, C_N$) каждого из веществ в водном объекте к соответствующим предельно допустимым концентрациям (ПДК) должна удовлетворять неравенству

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \ldots + \frac{C_N}{ПДК_N} \leqslant 1,$$

или, что то же

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{C_i}{ПДК_i} \leqslant 1. \qquad (1)$$

Физически это требование (1) выражает принцип аддитивности вредного действия веществ одного ЛПВ и заключается в том, что N веществ, каждое из которых содержится в его предельно допустимой концентрации (ПДК), проявляет такое же вредное действие, как любое из них, содержащееся в концентрации, равной N·ПДК.

Следовательно, с учетом требования (1) предельное состояние качества воды водного объекта выражается в виде

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{C_i}{ПДК_i} = 1, \qquad (2)$$

где концентрацию C_i можно рассматривать как некую максимально допустимую концентрацию C_i^{max}, т.е.

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{C_i^{max}}{ПДК_i} = 1. \qquad (3)$$

Равенство (3) может быть решено при условии сохранения между решениями C_i^{max} этих же отношений, что и существуют между установленными Правилами $ПДК_i$. Тогда можно написать:

$$\frac{C_1^{max}}{ПДК_1} = \frac{C_2^{max}}{ПДК_2} = \ldots = \frac{C_N^{max}}{ПДК_N} = x \qquad (4)$$

и зависимость (3) преобразуется

$$Nx = 1,$$

откуда получим, что

$$x = \frac{1}{N}.$$

На основе (4)

$$x = \frac{C_i^{max}}{ПДК_i} \qquad (i = 1,2,\ldots,N),$$

и следовательно,

$$\frac{1}{N} = \frac{C_i^{max}}{ПДК_i},$$

откуда

$$C_i^{max} = \frac{ПДК_i}{N}. \qquad (5)$$

Величину отношения (5) ($ПДК_i/N$) можно рассматривать, как некую предельно допустимую концентрацию (норматив), определяющую качество воды водного объекта при его нормировании с учетом целой группы вредных веществ одного ЛПВ. Обозначим

$$C_i^{max} = \frac{ПДК_i}{N} = ПДК_i^* \qquad (6)$$

и назовем эту величину ($ПДК_i^*$) локально-редуцированной предельно допустимой концентрацией.

Теперь предельное состояние качества воды (формула (3)) выражается в виде

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{ПДК_i^*}{ПДК_i} = 1, \qquad (7)$$

где $ПДК_i$ - установленные в приложениях Правил [1] ПДК, на основе которых определяют, с помощью формулы (6), их локально-редуцированные величины $ПДК_i^*$.

Из выражения (6) видно, что локально-редупированная ПДК какого-то i-го вещества уже не постоянная величина (как установленные Правилами [1] ПДК), а зависит от конкретных (локальных) условий решения задачи водоохраны - она зависит как от принятого на рассмотрение числа ингредиентов с оди-

наковым ЛПВ, так и от вида водопользования. Отсюда вытекает важный для практики вывод - при нормировании (прогнозировании) качества воды водных объектов (или разных частей одного и того же водного объекта) на основании локально-редуцированных ПДК ($ПДК_i^*$), последние должны быть определены для одного и того же вида водопользования при одном и том же числе N одних и тех же ингредиентов с одним и тем же лимитирующим признаком вредности (ЛПВ). Следовательно, в общем случае можем написать, что

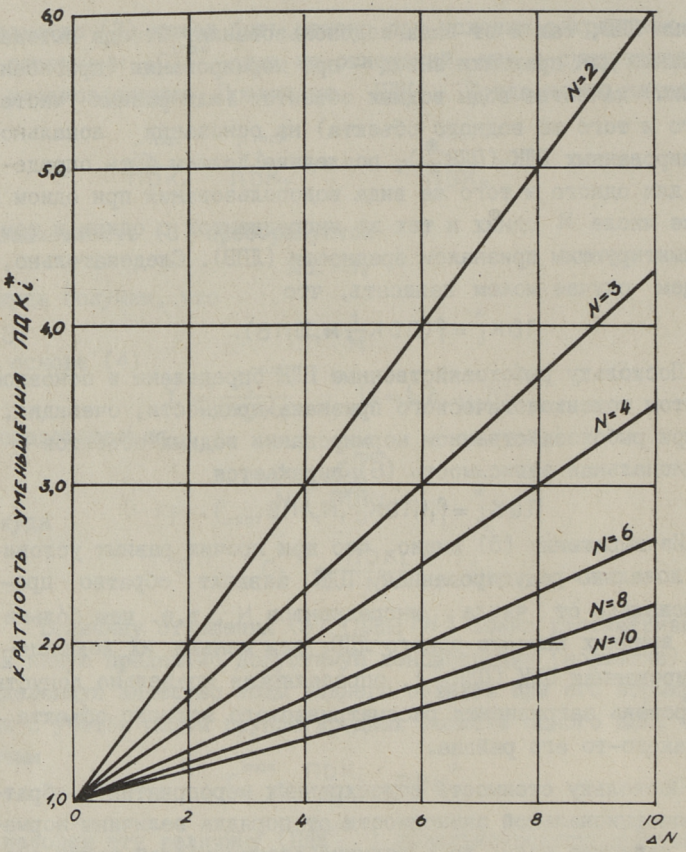
$$ПДК_i^* = f(ПДК_i, N, ЛПВ). \qquad (8)$$

Поскольку рыбохозяйственные ПДК определены в основном с учетом токсикологического признака вредности, очевидно, что при рыбохозяйственном нормировании водных объектов функциональная зависимость (8) выражается

$$ПДК_i^* = f_1(ПДК_i^{рх}, N, ЛПВ_{токс}).$$

Из выражения (6) видно, что при прочих равных условиях локально-редуцированная ПДК зависит обратно пропорционально от числа ингредиентов N, т.е. чем бóльше число вредных веществ одного ЛПВ, тем меньше их локально-редуцированная ПДК ($ПДК_i^*$), определяющая предельно допустимый уровень загрязнения рассматриваемого водного объекта или какого-то его района.

Поскольку стоимость водоохранных мероприятий в обратно пропорциональной зависимости от порядка величины нормативов качества воды, то с технико-экономической точки зрения очень важно знать (при решении водоохранной задачи с учетом суммации вредного действия веществ одного ЛПВ) те и только те вещества, которые играют основную роль в загрязнении водного объекта, т.е. надо знать (или определить) репрезентативные загрязняющие вещества (по одной или разным группам ЛПВ), число которых должно бы сохраняться при нормировании качества воды или определении предельно допустимых сбросов (ПДС). При появлении нового токсиканта (токсикантов) в районе водопользования (в результате строительства нового предприятия), необходимо его (их) включить в расчет; при этом легко показать, что разработанные уже локально-редуцированные ПДК уменьшаются по величине тем больше, чем меньше начальное число ингредиентов N в группе с одинаковым ЛПВ и чем больше число принимаемых в рас-



Фиг. 1. График расчета кратности уменьшения величины локально-редуцированной ПДК ($ПДК_i^*$) в зависимости от количества включаемых в расчет новых ингредиентов того же ЛПВ.

чет новых ингредиентов ΔN с тем же ЛПВ (фиг. I). Например, при N= 2 его увеличение на одно вещество (ΔN = I), начальная величина $ПДК_i^*$ уменьшается на 35 %, при N = I0 - всего 9 %. Следовательно, для успешного решения практических задач современной водоохраны очень важно иметь научно обоснованные типовые репрезентативные характеристики сточных вод предприятий разных отраслей промышленности, которые и служили бы, в обязательном порядке, нормированию качества воды на основе как пока действующих ПДК, так и их локально-редуцированных величин.

Как известно, предельно допустимая концентрация какого-то i-го вещества в сточных водах $ПДК_i^{ст}$, которой они могут быть сброшены в водный объект без нарушения в последнем нормативов качества воды, установленных Правилами [I], равна (без учета аддитивности вредного действия)

$$ПДК_i^{ст} = (n-1)(ПДК_i - C_{фi}) + ПДК_i, \qquad (9)$$

где, по данным [2]

$n = \frac{\gamma Q}{q} + 1$ – степень смешения (разбавления) сточных вод (q) природными (Q) (γ - коэффициент смешения);

$ПДК_i$ – установленный Правилами норматив качества воды по i-му веществу;

$C_{фi}$ – фоновая концентрация i-го вещества до спуска сточных вод в водный объект.

С помощью зависимости (9) можно определить реальную разбавляющую способность водного объекта (кратность разбавления) по ингредиентам:

$$K_i = \frac{ПДК_i^{ст}}{ПДК_i} = \frac{(n-1)(ПДК_i - C_{фi}) + ПДК_i}{ПДК_i} =$$

$$= (n-1)\left(1 - \frac{C_{фi}}{ПДК_i}\right) + 1, \qquad (10)$$

откуда и вытекает безразмерное условие реальной разбавляющей способности водного объекта, исходя из реального состояния качества воды (фоновой концентрации) последнего:

$$\frac{C_{фi}}{ПДК_i} < 1, \qquad (11)$$

или что то же самое

$$C_{фi} < ПДК_i.$$

При выполнении условия (II) K_i будет всегда больше единицы ($K_i > 1$), т.е. водный объект имеет бо́льшую или меньшую разбавляющую способность по ингредиентам. При $C_{фi}/ПДК_i = 1$ (условие (II) не выполняется) $K_i = I$, т.е. разбавляющая способность водного объекта полностью исчерпана.

При применении принципа аддитивности вредного действия можно написать

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{C_{фi}}{ПДК_i} < 1. \qquad (12)$$

Легко показать, что неравенство (I2) выполняется тогда, когда для каждого i-го вещества одного ЛПВ имеется (с учетом зависимостей (4) и (6))

$$\frac{C_{\phi i}}{ПДК_i} < \frac{1}{N},$$

или

$$C_{\phi i} < \frac{ПДК_i}{N} \equiv ПДК_i^*. \qquad (I3)$$

Итак, при применении принципа суммации вредного действия зависимость (I0) выражается в виде

$$K_i^* = (n-1)\left(1 - \frac{C_{\phi i}}{ПДК_i^*}\right) + 1,$$

которая действительна при условии (I3), или при $C_{\phi i}/ПДК_i^* < 1$.

Ясно, что в настоящее время водные объекты являются приемниками самых разнообразных промстоков, с которыми сбрасываются десятки и сотни различных вредных веществ. В воде водных объектов они подвергаются различным химическим процессам превращений, в результате которых образуются даже новые продукты. Таким образом, вода современных водных объектов представляет собой сложный раствор многочисленных веществ, вредное действие которых (или некоторых из них) может усиливаться (явление синергизма), или в других случаях ослабляться (явление антагонизма). Последнее является более желательным для практики случаем.

В практике водоохраны было бы необходимо знать действительную интенсивность синергизма (антагонизма) в стоках предприятий различных отраслей промышленности, а в первую очередь, для самых вредных (репрезентативных) веществ для более природоопасных технологий.

Очевидно, всестороннее изучение механизма синергизма (антагонизма) - это сложная и трудоемкая задача для практики, требующая многоплановых исследований до ее полного применения в водоохранном деле.

Литература

I. Правила охраны поверхностных водоемов от загрязнения сточными водами. М., I975. 38 с.

2. Черкинский С.Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. М., Стройиздат, I977. 224 с.

3. Методические указания по установлению предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ, поступающих в водные объекты со сточными водами. М., Мин-во мелиорации и водного хозяйства СССР, 1982. 16 с.

J. Säärekynno

L'établissement des normes de qualité des eaux de surface en cas de l'additivité de l'action nuisible des polluants de même indice de nocivité

Résumé

Cet article traite de l'établissement des normes qualitatives des eaux naturelles en cas de l'addition de l'action nuisible des substances polluantes de même indice de nuisibilité. On a fait entrer dans l'analyse un nouveau terme, appelé concentration maximale admissible localement réduite ($ПДК^{*}$), ce qui ne reste plus une grandeur constante (contrairement aux normes de qualité de l'eau de surface (ПДК) fixées par le Code de protection des eaux de surface contre leur contamination aux eaux résiduaires), mais varie, en cas général avec le nombre des substances nocives (N) dans le groupe des polluants de même indice de nuisibilité et la catégorie de l'utilisation de l'eau: $ПДК^{*} = ПДК/N$, où ПДК est en fonction de la catégorie de l'utilisation de l'eau.

On a établi la formule de calcul du degré de dilution réel des eaux d'égouts par celles naturelles $K_i^{*} = (n-1)x$ $x\ (1 - Cfi/ПДК_i^{*}) + 1$ et le critère adimensionnel pour évaluer la capacité de dilution de differents polluants (i) par les eaux naturelles, en portant de leur fond de contamination (Cfi) : $Cfi/ПДК_i^{*} < 1$ (n - indice de mélange des eaux d'egouts par celles naturelles).

№ 569

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.I73

Х.А. Тибар

О ЧАСОВОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСЕЛЕНИЕМ

При проектировании систем водоснабжения весьма значительную роль играет часовая неравномерность водопотребления. Указанная неравномерность в жилых районах города выражается типовыми графиками суточного водопотребления, где конкретные часовые расходы воды даются в процентах от суточного расхода. Нормы проектирования [I] таких графиков не содержат, но дают экстремальные значения коэффициентов часовой неравномерности

$$K_{час.макс} = \alpha_{макс}\,\beta_{макс},$$

$$K_{час.мин} = \alpha_{мин}\,\beta_{мин}.$$

где коэффициент α учитывает степень благоустройства зданий, а β учитывает количество жителей в населенном пункте.

В целях изучения характера часовой неравномерности водопотребления в условиях Эстонской ССР и для составления нового современного типового графика суточного водопотребления населением нами были проведены натурные исследования потребления воды на хозяйственно-бытовые нужды населения. Объектами исследования были жилые здания с числом жителей N =I80 ...700 и жилой район Мустамяэ города Таллина со средним числом жителей в период исследования 80000 чел. Характеристика объектов исследования:

Жилые здания: число этажей 5...9, степень благоустройства I (с централизованным горячим водоснабжением с водонагревателями в зданиях) и II(жилые здания с газовыми водонагревателями); средние напоры на вводе $H_{ср}$ = 30...36 м вод. ст. (регуляторы давления отсутствуют); перебоев в подаче воды не отмечалось; описание санитарного оборудования в каждой квартире: смесители на кухне и в ванной комнате и низкорас-

положенный смывной бачок; арендаторов в зданиях не имелось; среднее удельное водопотребление в жилых зданиях 250 л/сут на I жителя.

Жилой район: исследования режима водопотребления в районе были проведены по исходным данным 1972...1975 года, когда в районе была автономная зона центрального водопровода города с питанием водой только через насосную станцию Ш-го подъема; часовые подачи в сеть и отметки уровней воды в напорном резервуаре регистрировались в журнале н.с.; перебоев в подаче холодной воды не было; жилые здания были в основном пятиэтажные с I-й степенью благоустройства; общий удельный расход в период исследования составлял 260 л/сут на одного жителя, а удельный расход без арендаторов в районе 240 л/сут на одного жителя.

Натурные исследования в жилых зданиях проводились самопишущим водосчетчиком, сконструированным нами в ТПИ. Вращение центрального вала обычного крыльчатого водосчетчика передавалось на диск датчика, а светоимпульсы через отверстия в диске на фотосопротивление. Импульсы фиксировались на ленте самопишущего вольтметра Н-340. При расшифровке лент вольтметра учитывалось то обстоятельство, что используемые в жилых зданиях крыльчатые и турбинные водосчетчики регистрируют в ночные часы меньший расход, чем фактически поступает. При этом учитывались исследования, проведенные в ТПИ с целью определения характеристик водосчетчиков [2]. Измерения с самопишущими водосчетчиками проводились всего в двенадцати жилых зданиях города Таллина, причем период измерений в каждом доме был достаточно велик - 24...74 суток.

Для статистической обработки фактического водопотребления в жилом районе были приняты фактические графики подачи воды насосной станцией Ш-го подъема. Общая длительность периода наблюдений была 4 года, общее число рабочих дней 120, число выходных дней - 60. Статистическая обработка данных натурных исследований была проведена по методике, разработанной в НИИ коммунального водоснабжения и очистки воды Академии коммунального хозяйства РСФСР [3]. По указанной методике на первой стадии обработки было проведено усреднение фактических графиков потребления воды на каждом объекте исследования отдельно для рабочих и выходных дней, т.е. были

получены средние часовые расходы $Q_{ср}$ в л/чел и в процентах от суточного расхода. Затем после ранжирования часов суток от $q_{час.\ мин}$ до $q_{час.\ макс}$ в пределах каждого часа в отдельности определялись накопленные частоты появления часовых расходов, а на вариационной сетке закона нормального распределения (вероятностной бумаге) получали средние ранжированные значения часовых расходов $Q_{ср\ ранж.}$ 98 %-ной обеспеченности. В качестве примера в таблице I изложены соответствующие ранжированные графики водопотребления для жилых зданий (N = 500 жит.) и для жилого района (N = 80000 жит.), для рабочих дней, где часовые расходы выражены в процентах от суточного расхода.

Если принять $\alpha_{макс} = 1{,}4$ и $\alpha_{мин} = 0{,}45$ (в пределах, допущенных по СНиП), тогда получим значения коэффициентов β

при N = 500 жит. $\beta_{макс} = 1{,}9$; $\beta_{мин} = 0{,}38$,

при N =80000 жит. $\beta_{макс} = 1{,}2$; $\beta_{мин} = 0{,}69$,

которые несколько отличаются от нормативных их значений.

Полученные ранжированные графики водопотребления подтверждают, что в рабочие дни $q_{час.макс}$ отмечается в 21-22 час, а пик водопотребления наблюдается в интервале времени от 20 до 23 час. Полученный аналогичным способом график водопотребления для выходных дней, наоборот, показывает, что в жилом районе, а также в большинстве случаев в жилых зданиях $q_{час.макс}$ наблюдается в 10-11 час.

Следует отметить, что полученные нами средние ранжированные графики суточного водопотребления принципиально отличаются от графиков, приводимых ныне в справочниках по водоснабжению.

Анализ полученных коэффициентов часовой неравномерности водопотребления $K_{час} = \frac{Q_{ср\ ранж}}{4{,}17}$ в жилом районе, а также в жилых зданиях с различной численностью населения показал, что существует определенная зависимость $K_{час} = f(N)$ в каждом интервале времени. При этом значения $K_{час}$ определялись по данным не за одни сутки, а за весь период наблюдений. В логарифмических осях зависимость $K_{час}$ от N может быть принята линейной. Исходя из такого допущения, нами были составлены суточные графики водопотребления и для промежуточных

Таблица I

Часы суток	0-I	I-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-I0	I0-II	II-I2
Жилое здание	2,I	I,0	0,8	0,7	0,7	I,6	3,0	5,0	4,0	3,7	4,4	3,2
Жилой район	2,8	I,7	I,3	I,3	I,5	2,0	3,7	5,8	4,2	4,8	4,9	4,4

Продолж. табл. I

I2-I3	I3-I4	I4-I5	I5-I6	I6-I7	I7-I8	I8-I9	I9-20	20-2I	2I-22	22-23	23-24	
3,6	2,9	2,7	3,6	4,0	5,4	6,5	7,I	8,6	II,0	9,3	5,0	$K_{макс}$ = 2,64 $K_{мин}$ = 0,I7
4,6	4,5	4,I	4,0	4,6	5,I	5,9	6,2	6,5	7,2	5,5	3,4	$K_{макс}$ = I,73 $K_{мин}$ = 0,3I

Таблица 2

Типовые суточные графики водопотребления для рабочих дней. Часовые расходы в процентах от суточного расхода (в числителе $K_{час.макс}$, в знаменателе количество жителей в городе)

	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7
	$4 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	10^5	$5 \cdot 10^4$	$2{,}5 \cdot 10^4$	$1{,}5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$
0-1	2,9	2,9	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4
1-2	1,9	1,8	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0
2-3	1,6	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,6
3-4	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,6
4-5	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	0,8	0,8	0,8
5-6	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5
6-7	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9
7-8	5,4	5,5	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,3	6,4	6,5
8-9	4,2	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,7	3,6
9-10	5,0	4,9	4,9	4,8	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,4
10-11	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,1	5,0
11-12	4,2	4,2	4,1	4,1	4,0	3,9	3,8	3,7	3,7	3,6
12-13	4,8	4,7	4,6	4,5	4,5	4,4	4,3	4,1	4,0	3,9
13-14	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	4,1	3,9	3,8	3,7
14-15	4,2	4,1	4,0	4,0	3,9	3,8	3,6	3,4	3,3	3,2
15-16	4,1	4,1	4,0	3,9	3,8	3,6	3,4	3,3	3,1	3,0
16-17	4,8	4,7	4,6	4,6	4,5	4,4	4,3	4,1	4,0	4,0
17-18	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,2	5,1	5,0
18-19	5,5	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,9	7,1	7,1
19-20	5,6	5,8	6,1	6,4	6,7	7,1	7,4	7,9	8,3	8,6
20-21	5,7	6,0	6,3	6,7	7,1	7,4	7,9	8,5	9,0	9,3
21-22	6,2	6,7	7,1	7,5	8,0	8,4	9,2	10,0	10,0	11,2
22-23	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,4	5,4	5,4	5,4
23-24	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,7	2,7
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

значений числа населения в городе (при разных значениях $K_{час.макс}$), которые мы считаем возможным рекомендовать в качестве типовых графиков водопотребления в условиях Эстонской ССР (табл. 2).

Литература

I. СНиП П-3I-74. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. М., I975.

2. Тибар Х.А. Неучтенные расходы воды в зависимости от малой чувствительности водосчетчика. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, I977, № 420.

3. Методические указания по обобщению данных статистической отчетности, журналов обследования и проведению натурных исследований по теме 0.0I.328: "Определить фактическое водопотребление населением". М., I974.

H. Tibar

The Irregularity of the Water Consumption in Towns

Summary

To design the town's water-supply systems standard graphs of diurnal water consumption are used. To make up new standard graphs for present-day requirements some investigations were made on the irregularity of the water consumption in houses (170 ... 700 inhabitants) and in living districts (up to 80 000 inhabitants) in the Estonian SSR. These standard graphs obtained by the statistical processing can be used in towns with the population of 500 ... 400 000.

№ 569

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 628.356

Х.А. Мёльдер, Б.Н. Репин, Я.П. Ютт

РАЗРАБОТКА ОДНОКАМЕРНЫХ АЭРОТЕНКОВ-ОТСТОЙНИКОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ МАЛЫХ КОЛИЧЕСТВ СТОЧНЫХ ВОД

С конца 60-х годов в канализационных системах сельских поселков широко внедряются аэрационные очистные установки, предназначенные для полной биохимической очистки малых объемов сточных вод [1]. Число действующих установок к I января 1983 года составляло 743, а их общая суточная производительность превышала 74 тыс.м^3. По принципу действия большинство из них является аэротенками-отстойниками в основном с пневматической системой аэрации. Нашли также применение циркуляционно-окислительные каналы и кольцевые окислительные блоки с расположенным в центре вертикальным вторичным отстойником.

Традиционные аэротенки-отстойники, работающие обычно в режиме продленной аэрации, имеют ряд недостатков, которые снижают их эффективность в эксплуатации. Среди них можно отметить нерегулируемый возврат или, чрезмерное уплотнение ила в отстойнике во время перерывов аэрации, вынос ила с очищенной сточной водой при пиковых гидравлических нагрузках и т.д. Все эти недостатки связаны с вторичным отстойником.

По данным Агентства по охране окружающей среды США из-за недостаточно-эффективной работы вторичных отстойников 46 % станций страны не обеспечивают очистку сточных вод по взвешенным веществам [2]. Кроме того, при широком внедрении установок в Эстонской ССР выявлены сложности применения как напорной, так и механической аэрации. В первом случае не хватает подходящих воздуходувок, во втором - отсутствуют вообще серийно производимые надежные механические аэраторы.

Отмеченные недостатки привели к созданию однокамерных аэротенков с периодическим режимом работы, где в одной емкости чередуются периоды заполнения, аэрации, отстаивания, опорожнения и регенерации активного ила.

Так как сточные воды (в зависимости от их источника) поступают более или менее непрерывно, то очевидно, следует иметь несколько параллельных емкостей, рабочие циклы которых смещены во времени. За рубежом такие однокамерные установки называют реакторами последовательно-периодического действия (Sequencing Batch Reactors) [3]. Обычно рекомендуется иметь 3-4 параллельных отсеков. Их работой управляют при помощи микропроцессора и электрифицированных задвижек, что усложняет эксплуатацию очистных сооружений особенно в условиях малой канализации.

Так, например, в США [4] в сельской местности работают две аналогичные установки периодического действия. Установки состоят из трех параллельно действующих однокамерных аэротенков периодической работы и из одной маленькой секции для уплотнения ила перед окончательным обезвоживанием. Каждый аэротенк снабжен автоматическим (электрифицированным) вентилем для впуска сточной воды, смесителем, насосом, воздуходувкой, аэратором, системой откачки очищенной сточной воды и датчиками уровня. Из аэротенков сточная вода поступает в биопрудн, перед чем предусмотрена возможность хлорирования. Воду из биопрудов можно использовать на орошение. Управление очистной станцией полностью автоматизировано и контролируется компьютером.

На другой установке два аэротенка периодической работы снабжены поверхностными аэраторами. Сточная вода с помощью электрифицированных задвижек направляется попеременно в один или другой аэротенк, которые соединены водосливом. Очищенная вода отводится через сборные трубы, тоже снабженные электрифицированными задвижками. В самых глубоких точках резервуаров установлены две трубы, отводящие избыточный активный ил. Управление установкой происходит также автоматически.

Модификацией аэротенков с периодическим режимом работы применительно к условиям малой канализации является однокамерный аэротенк, состоящий из двух параллельно работающих

отсеков [5]. Для распределения сточных вод между отсеками используется качающийся желоб, соединенный с поплавками, а для аэрации иловой смеси применяется система струйной аэрации.

Положительными сторонами аэротенков с периодическим режимом работы являются, во-первых, улучшенные условия осаждения взвешенных веществ и активного ила. Так как в аэротенке во время цикла осаждения нет проточного движения воды, практически исключается возможность выноса активного ила.

Во-вторых, отпадает проблема возвращения активного ила из отстойника в аэротенк, так как однокамерный аэротенк периодического действия последовательно выполняет функции камеры аэрации и вторичного отстойника.

В-третьих, учитывая, что перерывы в аэрации не приводят к проблемам возврата залежавшегося и уплотнившегося активного ила на дне отстойника, установка является эффективной при необходимости удаления азота методом нитрификации-денитрификации.

В-четвертых, при возможной недогруженности установки вначале эксплуатации, используя датчики уровня, легко отрегулировать рабочий объем емкости, а тем самым работу установки соответственно реальным условиям.

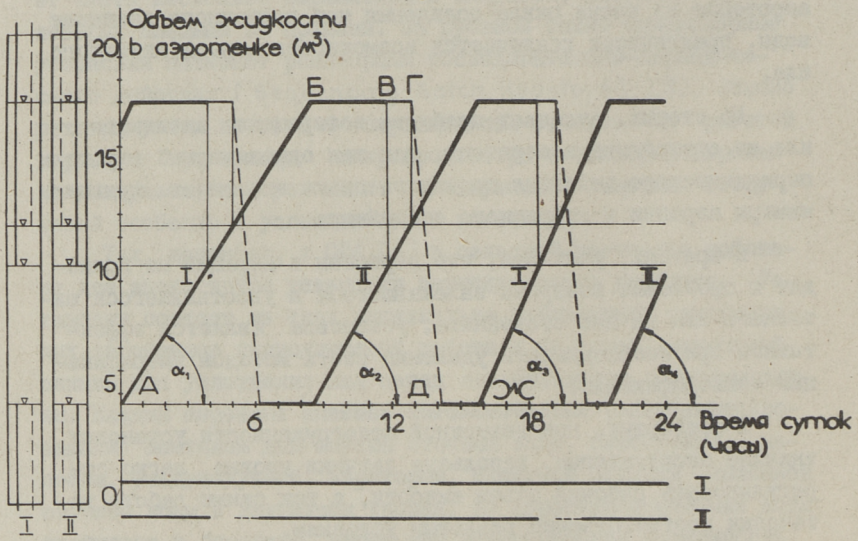
В-пятых, применение струйной аэрации позволяет использовать в качестве оборудования серийно изготовляемые канализационные насосы.

Для исследования кинетики процесса очистки в производственных условиях и разработки проектных параметров однокамерных аэротенков применительно техническому решению [5] начата реконструкция очистных сооружений пос. Харку-Ярве.

Из поселка поступают бытовые сточные воды со средним расходом в сухую погоду 46,4 м^3/сут; $K_{сут}$ = I,I; $K_{общ}$=I,5. Нагрузка по загрязнениям составляет по $БПК_5$ 3,5 кГ/сут при эквивалентном числе жителей N = I48 чел.

Согласно проектному решению промышленная очистная установка состоит из двух круглых в плане резервуаров полезным объемом I8 м^3 каждый. На дне резервуаров установлены горизонтально одноступенчатые струйные аэраторы с диамет-

ром сопла 25 мм и для отвода очищенной сточной воды погруженные насосы - "ГНОМ-10А" на поплавке. Резервуары снабжены датчиками уровня для управления аэрационными насосами и насосами откачки очищенной воды. Резервуары работают попеременно, направление поступающей сточной воды в один или в другой резервуар происходит автоматически с помощью специального качающегося желоба.



Фиг. 1. Расчетная фазовая характеристика работы очистной установки пос. Харку-Ярве.

$\alpha_1 = 57°$; $\alpha_2 = 62°$; $\alpha_3 = \alpha_4 = 68°$

——— - включена аэрация,

— — — - включен насос откачки очищенной воды.

В работе установки можно выделить пять последующих циклов (см. фиг. I):

I) заполнение аэротенка I, во время чего аэрация включена (А-Б). Продолжительность цикла на опытной установке в среднем 6 часов 45 минут (заполняемый объем - I3,5 м³);

2) аэротенк заполнен, поступающая сточная вода автоматически перенаправлена в аэротенк П. Аэрация остается включенной в среднем еще на 3 часа (Б-В);

3) цикл осветления (В-Г), аэрация в аэротенке I выключена.

Продолжительность в среднем один час.

4) откачка осветленной воды из аэротенка I (Г-Д). Насос на поплавке позволяет откачать осветленную воду с поверхностных слоев. Продолжительность откачки I час 20 минут.

5) регенерация ила (Д-Ж). После откачки осветленной воды в аэротенке I остается определенный объем активного ила (4,5 $м^3$), аэрация включена. Продолжительность цикла в среднем I час 40 минут.

Таким образом, период аэрации на опытной установке в зависимости от времени суток меняется в пределах I0-I4 часов, а продолжительность всего цикла работы в пределах I2-I6 часов.

На установке предполагается изучить кинетику процесса окисления органических веществ, а также процесс осветления очищенных сточных вод с разработкой методики расчета однокамерных аэротенков-отстойников с периодическим режимом работы.

Большой практический интерес представляет также исследование возможности совместного применения процессов симультанного осаждения и нитрификации-денитрификации в подобных установках с целью высокоэффективного удаления из сточных вод фосфора и азота.

Литература

I. Мёльдер Х.А. Аэрируемые очистные установки на объектах малой канализации Эстонской ССР. ЦБНТИ Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР. Экспресс-информация "Мелиорация и водное хозяйство" Сер. 4, вып. 3. М., I98I, с. 9-II.

2. Tuntoolavest M., Miller E., Grady C., Leslie P. Factors affecting the clarification performance of activated sludge final settlers. - J.W.P.C.F., 1983, N 3, pt. 1, p. 234-248.

3. Bunch R.L. New trends in biological wastewater treatment in USA. Wysokoefektywne metody oczyszczania sciekow. Materialy na konferencje naukowa. Czesc II. Politechnika Krakowska. Krakow, 1981, 101-115.

4. Kamber D.M., Whang I.S. Design of a

sequencing batch activated sludge treatment (SBAST) plant for rural communities. - AICHE Symp. Ser., 1980, 76, N 197, p. 278-287.

5. А.с. № 937351 (СССР). Устройство для биохимической очистки сточных вод. / Э.Э. Кирт, Х.А. Мельдер, Ю.Ю. Хейнпалу, Г.С. Попкович, Б.Н. Репин. - Опубл. в Б.И., 1982, № 23.

H. Mölder, B. Repin, J. Ütt

Elaboration of Sequencing Batch Reactors for Biological Purification of Small Amounts of Sewage

S u m m a r y

The defects of the known technical solutions of compact aeration-settling tanks, the working principle of the sequencing batch reactor and experimental installation are described. The problems under study are mentioned.

№ 569

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 658.264

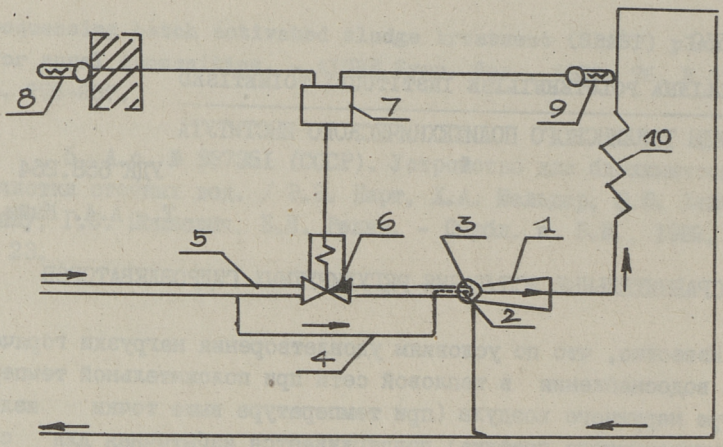
Т.- А.А. Кыйв

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ГИДРОЭЛЕВАТОРОВ

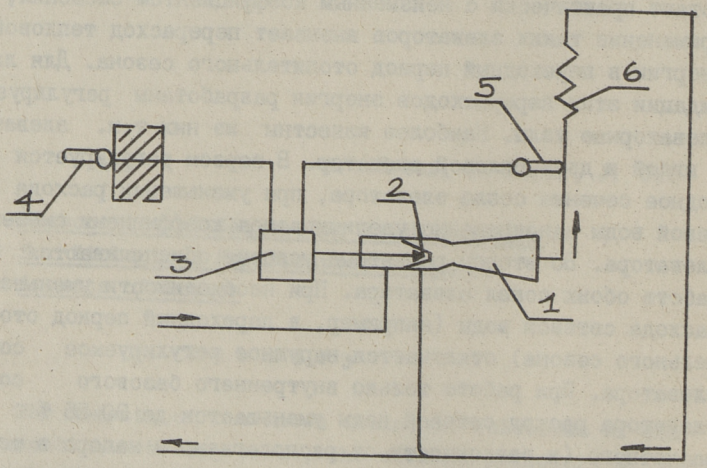
Известно, что по условиям удовлетворения нагрузки горячего водоснабжения в тепловой сети при положительной температуре наружного воздуха (при температуре выше точки излома температурного графика) поддерживается избыточная для систем отопления температура сетевой воды.

В Советском Союзе и некоторых странах социалистического содружества подавляющее большинство систем отоплений зданий присоединяются к двухтрубным тепловым сетям через водоструйные насосы-элеваторы. Традиционные гидроэлеваторы работают практически с неизменным коэффициентом смешения, а применение таких элеваторов вызывает перерасход тепловой энергии в переходный период отопительного сезона. Для ликвидации этих перерасходов энергии разработаны регулируемые элеваторные узлы. Наиболее известны из них т.н. элеватор с иглой и двухсопловой элеватор. В первом регулируется выходное сечение сопла элеватора, при уменьшении расхода сетевой воды одновременно увеличивается коэффициент смешения элеватора. Во втором расчетные условия обеспечиваются при работе обоих сопел элеватора. При необходимости уменьшения расхода сетевой воды (например, в переходный период отопительного сезона) отключается наружное регулируемое сопло элеватора. При работе только внутреннего базового сопла элеватора расход сетевой воды уменьшается до 30-55 % от расчетного (в зависимости от располагаемого напора в точке присоединения элеватора), а коэффициент смешения элеватора увеличивается.

На фиг. I и 2 приведены принципиальные схемы испытываемых элеваторных узлов для автоматизированного отпуска тепла на отопление.



Фиг. 1. Принципиальная схема элеваторного узла с двухсопловым элеватором для автоматического отпуска тепла на отопление:
1 – элеватор; 2 – базовое сопло; 3 – регулируемое сопло; 4 – трубопровод сетевой воды, подключенный к базовому соплу; 5 – трубопровод сетевой воды; 6 – соленоидный вентиль; 7 – электронный регулятор ТРЕ; 8 – датчик температуры обратной воды после системы отопления; 9 – датчик температуры наружного воздуха; 10 – система отопления.



Фиг. 2. Принципиальная схема автоматизированного элеваторного узла (элеватор с иглой):
1 – элеватор; 2 – игольчатый плунжер с соплом; 3 – исполнительный механизм с электронным регулятором; 4 – датчик температуры наружного воздуха; 5 – датчик температуры смешанной воды после элеватора; 6 – система отопления.

На фиг. I показан элеваторный узел с двухсопловым элеватором и с узлом управления, который включает электронный регулятор температуры Харьюского Эстколхозстроя с датчиками наружнгс воздуха и обратной воды в виде медных термометров сопротивления, и соленоидный вентиль, приспособленный для работы в условиях повышенных температур.

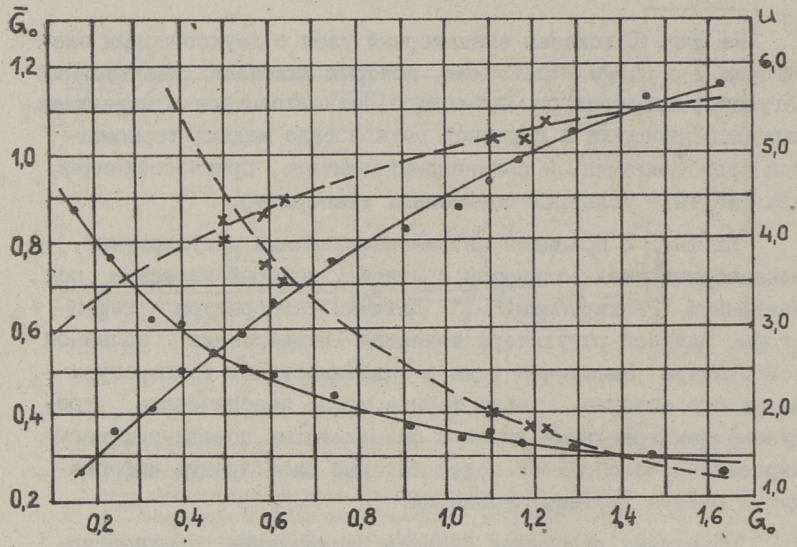
На фиг. 2 приведен автоматизированный регулируемый элеваторный узел (элеватор с иглой), который известен под названием "Электроника Р-I". Датчики температуры - термисторы. Задачей регулятора является поддержание заданной температуры смешанной воды в зависимости от температуры наружного воздуха. Однако точнее можно обеспечивать требуемый температурный режим в отапливаемых помещениях регулированием по обратной воде, который дает лучшую информацию о работе системы отопления.

Объектами испытания явились пятиэтажные 60-квартирные крупнопанельные жилые здания серии 111-121 Э2 с расчетной отопительной нагрузкой. $Q_{o.p}$ = 267 кВт, расчетным расходом сетевой воды $G_{c.p}$ = 2,9 м^3/ч и расчетным расходом воды в системе отопления $G_{o.p}$ = 9,2 м^3/ч. Системы отопления присоединены к тепловым сетям по зависимой схеме с элеваторами № 3.

Подогреватели горячего водоснабжения включены по смешанной схеме. Теплоснабжение объектов (жилрайон Вяйке-Нйсмяэ) от Мустамяэской районной котельной г. Таллина. Системы отопления однотрубные с П-образными стояками и с нижней разводкой. Отопительные приборы - стальные штампованные радиаторы РСГ (ЭС).

Располагаемая разность напора в точках присоединения испытываемых элеваторов 20 м. Расчетный коэффициент смешения u = 2,2.

Для регистрации расходов и температур в тепловые пункты были установлены расходомеры ИР-5I с самопишущими миллиамперметрами и электронные потенциометры, а для измерения разности напоров ΔH лабораторные манометры (класс точности 0,6). По результатам измерений были определены гидравлические сопротивления отопительной системы. Сопротивление системы отопления с двухсопловым элеватором S_{o_I} = = 0,0I35 м.ч^2/м^6, а разности напора ΔH_I = I,I4 м при



Фиг. 3. Характеристики элеваторов, снятые на опытных объектах:
——— – характеристики элеватора с иглой;
– – – – – – оптимальная для однотрубной системы отопления;
• – эксплуатационные точки элеватора с иглой;
× – эксплуатационные точки двухсоплового элеватора;
$\bar{G}_c = \frac{G_c}{G_{c.p}}$; $\bar{G}_o = \frac{G_o}{G_{o.p}}$;
u – коэффициент смешения элеватора.

расчетном расходе $G_{o.p}$. Сопротивление системы отопления с регулируемым элеватором (элеватор с иглой) $S_{o_{II}}$ = 0,0164, а ΔH_{II} = 1,39 м при $G_{o.p}$.

Основная характеристика элеватора, представляющая зависимость относительного расхода смешанной воды (расход, отнесенный к расчетному значению) на систему отопления от относительного расхода сетевой воды на отопления, а также изменение коэффициента смешения от относительного расхода сетевой воды даны на фиг. 3. По графику видно, что рабочие точки двухсоплового элеватора выше характеристики элеватора с иглой и близки к оптимальным величинам. Так как при одном расходе сетевой воды G_c при работе двухсоплового элеватора расход воды циркулирующий в системе отопления G_o значительно больше, выше устойчивость системы отопления (разрегулировки системы практически не соблюдается).

Так как элеваторы с иглой ("Электроника Р-I") изготовляются только одним диаметром сопла (элеватор № 3 имеет сопло I0 мм, а для исследуемого объекта требуется 8 мм) нужно ограничение минимального расхода сетевой воды для предотвращения разрегулировки системы отопления, чего и подтвердила эксплуатация элеватора с иглой при высоких температурах наружного воздуха, более + 5°С. Верхнее ограничение расхода сетевой воды для элеватора с иглой нужно для ликвидации перерасхода сетевой воды (для предотвращения разрегулировки тепловых сетей).

Таким образом, для нормального функционирования системы отопления и системы теплоснабжения в целом, при массовом использовании элеваторов с иглой, нужно ограничение хода игольчатого плунжера этих элеваторов.

Испытания показали, что двухсопловые элеваторы по сравнению с изготовляемыми элеваторами с иглой имеют более широкий диапазон регулирования (см. фиг.3). Экономия тепла при работе автоматизированных двухсопловых элеваторных узлов составляет I5 % за отопительный период.

T. Kõiv

The Comparative Test of Jet Pumps

S u m m a r y

In the article a comparison of the two-nozzle jet pump and the needle-type jet pump for central heating systems is presented.

The requirement to improve the construction of the needle-type jet pump is reported.

Содержание

I. Э.Г. Каск, Л.Л. Пааль. Определение максимального повышения давления при ускоренном движении жидкости в напорных трубах..... 3

2. Э.Г. Каск, Т.А. Коппель. Визуализация разгона жидкости с поплавком в короткой трубе..... I3

3. Л.Я. Айнола, У.Р. Лийв. Коэффициент трения при ускоренных движениях в трубах..... 2I

4. У.Р. Лийв. К расчету турбулентных неустановившихся движений жидкости в трубах..... 33

5. Я.Я. Кару. Улучшение работы контактных осветлителей на основе результатов натурных и лабораторных исследований..... 45

6. Ю.Я. Сяэрекыннo. К вопросу нормирования качества воды с учетом аддитивности вредного действия загрязняющих веществ с одинаковым лимитирующим показателем вредности (ЛПВ)..... 5I

7. Х.А. Тибар. О часовой неравномерности водопотребления населением 59

8. Х.А. Мельдер, Б.Н. Репин, Я.П. Ютт. Разработка однокамерных аэротенков-отстойников циклического действия для очистки малых количеств сточных вод..... 65

9. Т.А. Кыйв. Сравнительные испытания регулируемых гидроэлеваторов..... 7I

Цена 70 коп.