

Лр. 6.1  
637

ISSN 0136-3549

0203-9702

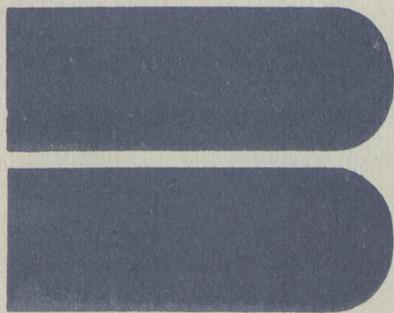
TALLINNA  
POLÜTEHNILISE INSTITUUDI  
TOIMETISED

637

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
ИНСТИТУТА

**ТРИ**  
**'87**

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ  
ПРОЦЕССЫ В  
СИСТЕМАХ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И  
ВОДООТВЕДЕНИЯ





УДК 628.34  
532.621



**НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ  
ПРОЦЕССЫ В  
СИСТЕМАХ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И  
ВОДООТВЕДЕНИЯ**

**Санитарная техника XIX**

**Таллин 1987**

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
 ТУУДИ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТИ

УДК 628.84  
 628.621

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ  
 ПРОЦЕССЫ В  
 СИСТЕМАХ  
 ВОДОСНАБЖЕНИЯ И  
 ВОДООТВЕДЕНИЯ

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Труды ТПИ № 637

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ  
 ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Санитарная техника XIX

На русском языке

Ответственный редактор Х. Тибар

Техн. редактор Е. Зорина

Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 17.04. 1987 г.

Подписано к печати 30.07.87 г.

МВ-08346

Формат 60x90/16

Печ. л. 4,5+0,5 приложение

Уч.-изд. л. 3,87

Тираж 300

Заказ № 292

Цена 75 коп.

Таллинский политехнический институт

200108 Таллин, Эхитаяте tee, 5

Ротапринт ТПИ

200006 Таллин, ул. Коскла, 2/9



1987 г. издана

УДК 628.34

Л.Л. Пааль

ИТОГИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ НА КАФЕДРЕ  
САНИТАРНОЙ ТЕХНИКИ ЗА 50 ЛЕТ

Научно-исследовательские работы проводятся на кафедре санитарной техники с первых дней существования ТПИ, причем первой материальной базой являлась лаборатория гидравлики в подвале главного здания института на ул. Калинина 101. Первым инициатором научных работ был профессор А.А. Вельнер. Им была развернута научно-исследовательская деятельность в области гидрологии, гидравлики открытых русел, водоснабжения, канализации и водного хозяйства. Научные работы А.А. Вельнера имели всегда большое практическое и прикладное значение.

В 1944 году А.А. Вельнер был приглашен на кафедру гидротехники и дорожного строительства Таллинского политехнического института, заведующим которой его назначили в 1947 году.

В 1946 году А.А. Вельнеру ВАК было присвоено звание профессора, в 1947 – присвоена ученая степень доктора технических наук.

В 1950 году А.А. Вельнер вышел на пенсию в связи с ухудшением здоровья. Развитию науки он отдал все свои силы и огромную эрудицию ученого.

В первые годы после Великой Отечественной войны на кафедре отсутствовали квалифицированные кадры преподавателей. Кроме этого, основным направлением исследований являлась гидравлика открытых русел и гидротехнических сооружений. Экспериментальная база не позволяла проводить научные работы в других направлениях, а также в то время использовались примитивные приборы для измерения гидравлических величин как водосливы для измерения расходов, трубка Пито для измерения

скоростей и др. Несмотря на все трудности, уже в 1947 году Л.А. Тепакс защитил кандидатскую диссертацию по проблеме гидравлических сопротивлений открытых русел.

Такое же примитивное оборудование еще многим служило базой при защите кандидатских диссертаций, как, например, Х.А. Тибару (Гидравлика водосливов с широким порогом), Л.Л. Паалю (Гидравлика нижнего бьефа) и У.Р. Лийву (Нестационарное движение жидкости в напорных трубопроводах). В пятидесятых годах огромную помощь кафедре оказали профессора Ленинградского политехнического института как в виде руководства, так и при защите диссертаций. Там же учились в аспирантуре Х.А. Вельнер и А.М. Айтсам. При Ленинградском политехническом институте защитили свои кандидатские диссертации Х.А. Вельнер (1954 г.), Х.А. Тибар (1958 г.), Л.Л. Пааль (1959 г.), А.М. Айтсам (1959 г.) и У.Р. Лийв (1966 г.). Основная тематика научного исследования в этот период состояла из проблем гидравлики.

Для улучшения материальной базы кафедры в пятидесятых годах преподаватели начали выполнять тематику хозяйственных работ. Первые из них – заказы Гидропроекта по моделированию отдельных элементов судоходных шлюзов Воткинской ГЭС. В дальнейшем основным предметом исследования было улучшение рабочих характеристик гидротурбин.

Научные работы комплексного исследования качества воды водных объектов были начаты в 1962 году. Для выполнения этой тематики проводились одновременно гидравлические, гидрологические, микробиологические и другие исследования, а также исследования очистки сточных вод. Базой научного исследования являлась, созданная в 1962 году, проблемная лаборатория санитарной техники (научный руководитель Л.А. Тепакс, с 1964 г. доц. Х.А. Вельнер). Целью первой обширной работы была оценка загрязненности водоемов Эстонской ССР, включая разработку мероприятий, предотвращающих их загрязнение. Эта и последующие работы названной тематики в 1967 году удостоены премий Советской Эстонии (состав коллектива: Х.А. Вельнер, А.М. Айтсам, Л.Л. Пааль, А.Г. Каск и Ю.Э. Калмяэ).

Существование проблемной лаборатории создало обширные условия для проведения научно-исследовательских работ и для

совместной работы с другими научными центрами Советского Союза. Началом научной школы качества воды водных объектов в ТПИ следует считать 1965 год, когда в Таллине проводился первый Всесоюзный симпозиум "Смешение и самоочищение воды водоемов" [1]. Одной из основных задач этого симпозиума было ознакомление во всесоюзном масштабе с работами, проводимыми в Таллинском политехническом институте (авторы Х.А. Вельнер, Л.Л. Пааль, А.М. Айтсам, А.Г. Каск и др.). Участниками симпозиума были представители более чем из 30 научных организаций, высших школ и проектных институтов. Основные из них – ВНИИВОДГЕО Госстроя СССР, МИСИ, ЛИСИ, ГТИ, ГХИ, ВНИИВО и др. Аналогичные всесоюзные симпозиумы проводились в 1967, 1969, 1972, 1975, 1979 и 1985 годах. Кроме этого, исследования, проведенные в ТПИ по проблемам прогнозирования и регулирования качества воды водных объектов, известны за рубежом.

В рамках указанного научного направления были подготовлены и успешно защищены 5 докторских диссертаций (А.М. Айтсам 1968 г. [2], Х.А. Вельнер 1968 г. [3], Л.Л. Пааль 1971 г. [4], А.Э. Саава 1974 г. и У.Р. Лийв 1983 г. [5]). Докторская диссертация У.Р. Лийва касалась проблемы нестационарного течения жидкости в напорных круглых трубопроводах, причем в этом направлении создана новая научная школа по гидравлике.

Результаты исследования, выполняемые преподавателями и сотрудниками кафедры, опубликованы во многих научных изданиях СССР и других стран, изданы 18 научных сборников ТПИ по санитарной технике и 28 монографий, учебников и брошюр. Общее количество публикаций более 1000. Приводим основные из них без анализа содержания.

По вопросам смешения загрязняющих веществ в реках и прогнозу качества воды [6, 7, 8]. Регулирование качества воды водоемов [9, 10, 11]. Качество воды морских вод, тематические модели и экспериментальные исследования [12, 13, 14]. Физика и внутренняя структура напорного потока при нестационарном течении [15, 16, 17].

Многие ведущие ученые кафедры являются представителями международного сотрудничества. Например: Х.А. Вельнер – Международная конвенция охраны Балтийского моря от за-

грязнения, Л.Л. Пааль — страны-члены СЭВ, У.Г. Лийв — Международная ассоциация гидравлических исследований и др.

С 1981 года проблемная лаборатория санитарной техники переведена в состав Института прикладной геофизики и научная тематика кафедры концентрируется на более конкретных темах. Материальная база кафедры укрепилась. Разработана система автоматического проведения экспериментов и обработка их на базе ЭВМ СМ-4 (руководитель У.Р. Лийв). Получены современные приборы для измерения распределения скоростей жидкости (термоанемометр 1973 г. и лазерный доплеровский анемометр 1983 г.). Все это позволяет провести сложные гидродинамические эксперименты на мировом уровне.

Основные научные достижения кафедры внедрены в практику. Важнейшими из них являются: перспективное развитие водоснабжения, научные основы реконструкции канализации города Таллина вместе с глубоководным выпуском сточных вод, разработка мероприятий охраны водоемов ЭССР от загрязнения сточными водами, малогабаритные биологические очистные сооружения, прогнозирование качества воды рек Волги, Оби, Иртыша и др. Экономический эффект от внедрения составляет более 15 млн. руб. Многие результаты исследования включены в состав нормативных документов и методических материалов.

Ведущие ученые кафедры избраны членами во многие советы, комиссии и секции СССР. Например, проф. Л.Л. Пааль является членом НТС водоснабжения и канализации Госстроя СССР, членом НТС Минвуза СССР по водоснабжению и канализации; проф. У.Р. Лийв является членом Национального комитета СССР Международной ассоциации гидравлических исследований и др. На базе кафедры при ТПИ создан специализированный совет защиты кандидатских диссертаций по специальности "Водоснабжение и канализация" (председатель проф. Л.Л. Пааль).

В настоящее время на кафедре решаются следующие основные научные проблемы: прогнозирование и регулирование качества воды водных объектов (проф. Л.Л. Пааль), закономерности нестационарного течения жидкости в напорных трубах (проф. У.Р. Лийв), современные методы очистки природных вод (к.т.н. Я.Я. Кару), технология очистки сточных вод (доц. Х.А. Мельдер), приборы для измерения растворенного в воде кислорода (с.н.с. Р.В. Марвет) и др.

## Л и т е р а т у р а

1. Научные доклады по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. - Таллин, 1965. - 250 с.
  2. А й т с а м А.М. Турбулентная диффузия веществ загрязнения, сбрасываемых сточными водами в море: Автореф. дис. д-ра физико-математических наук. - М., 1968. - 23 с.
  3. В е л ь н е р Х.А. Прогнозирование качества воды водоемов в водохозяйственных исследованиях: Автореф. дис. д-ра техн. наук. - Таллин, 1968. - 33 с.
  4. П а а л ь Л.Л. Основы методов расчета турбулентной диффузии вещества загрязнения в водотоках: Автореф. дис. д-ра техн. наук. - Таллин, 1971. - 32 с.
  5. Л и й в У.Р. Теоретические и экспериментальные основы расчета напорного ускоренного движения жидкости в цилиндрических трубах. - Л., 1983. - 38 с.
  6. П а а л ь Л.Л. Инженерные методы расчета формирования качества воды водотоков. I и II часть / ТПИ. - Таллин, 1976. - 155 с.
  7. Основы прогнозирования качества поверхностных вод (авторы Фальковская Л.Н., Каминский В.С., Пааль Л.Л., Грибовская И.Ф.). - М.: Наука, 1982. - 314 с.
  8. P a a l L., M ö l d e r H., T i b a r H. Veevarustus ja kanalisatsioon. - Tln.: Valgus, 1981.
  9. В е л ь н е р Х.А. Принципы охраны водных ресурсов: Международные высшие гидрологические курсы ЮНЕСКО. - Обнинск, 1970.
  10. V e l n e r H.A. Influence de l'activité humaine aux qualités de l'eau. Génie de protection des eaux contre la pollution // Recueil des annotations des conférences concernant le problème: "Influence de l'activité humaine aux processus et phénomènes hydrologiques". - 1972.
- II. В е л ь н е р Х.А. Проблемы регулирования качества воды водоемов и Балтийского моря: Материалы VI Всесоюз. симпоз. по современным проблемам самоочищения водоемов и регулирования качества воды. - Таллин, 1979. - Секция III. - Гл. I, 3-II.

12. А й т с а м А.М. Основы прогнозирования качества воды под действием человека: Международные высшие гидрологические курсы ЮНЕСКО. - Обнинск, 1970.

13. A i t s a m A. Principles of mathematical modeling of complex utilization of water resources of inland sea basins // Abstracts of the lectures. Inters. Hydrological Decade. - Moscow, 1972.

14. A i t s a m A. Measures adopted in the USSR to decrease the pollution of Baltic Sea // Report of the ICES/SCOR. - Lissabon, 1973.

15. Л и й в У. Экспериментальное исследование ускоренного переходного течения в трубах // Изв. АН СССР. Водные ресурсы. - М., 1981. - № 3.

16. Л и й в У. К расчету турбулентных неустановившихся движений жидкости в трубах // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1984. - № 569. - С. 33-44.

17. Л и й в У. Измерение мгновенных скоростей в напорном трубопроводе при неустановившемся движении жидкости. // Тр. Коорд. совещания по гидротехнике / ВНИИГ. - Л., 1969. - № 31.

L. Paal

Results of Scientific Technical Research Carried out at the Department of Sanitary Engineering during the Last 50 Years

Abstract

The present paper deals with the results of the researches performed at the Department of Sanitary Engineering during its existence. The main directions are as follows: treatment of natural and sewage waters, forecast and regulation of water quality of water objectives, non-steady flow of fluids in pressure pipe-lines.

Х.А. Мельдер, Я.П. Ютт

НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РАБОТЫ МАЛЫХ  
АЭРОТЕНКОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

В отличие от аэротенков непрерывного действия в установках циклического режима подача и отведение сточных вод (субстрата) не происходят одновременно. Основой для вывода расчетных зависимостей процесса здесь являются уравнения материального баланса субстрата и биомассы для одного цикла (периода). Совершенная модель циклического процесса биочистки должна учитывать как кинетику процесса, так и гидродинамику аэротенка.

Рабочий цикл аэротенка целесообразно разделить на пять последующих фаз и исследовать эти фазы отдельно.

Фазы работы аэротенка циклического действия и соответствующие их продолжительности [1]:

- 1) заполнение -  $t_{\text{зап}}$ ;
- 2) контактная аэрация -  $t_{\text{кон}}$ ;
- 3) отстаивание -  $t_{\text{отст}}$ ;
- 4) опорожнение -  $t_{\text{оп}}$ ;
- 5) регенерация -  $t_{\text{рег}}$ .

При исследовании модели используются следующие параметры и их обозначения (см. рис. 1):

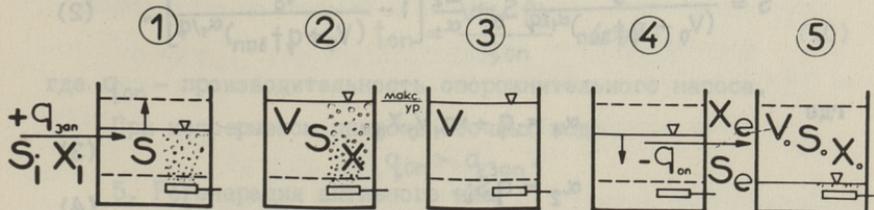


Рис. 1. Схема работы аэротенка циклического действия.

- $S_i$  - БПК<sub>п</sub> поступающей сточной воды, мг/л;  
 $S$  - БПК<sub>п</sub> смеси во время заполнения аэротенка, мг/л;  
 $S_e$  - БПК<sub>п</sub> в очищенной воде, мг/л;  
 $S_0$  - БПК<sub>п</sub> в конце регенерации, мг/л;  
 $X_i$  - концентрация взвеси в поступающей сточной воде, мг/л;  
 $X_e$  - концентрация взвеси в очищенной воде, мг/л;  
 $X$  - концентрация активного ила в камере аэрации (во время аэрации), мг/л;  
 $X_0$  - концентрация активного ила во время регенерации, мг/л;  
 $V_0$  - объем активного ила (после опорожнения), л;  
 $V$  - общий объем ила и сточной воды в заполненном аэротенке, л.

Обозначим

$$\frac{V_0}{V} = f, \quad (I)$$

тогда

$$V = V_0 + q t_{\text{зап}},$$

- где  $q$  - расход сточных вод, л/сут,  $q = q_{\text{зап}}$ ;  
 $t$  - продолжительность цикла, сут;  
 $t = t_{\text{зап}} + t_{\text{кон}} + t_{\text{отст}} + t_{\text{он}} + t_{\text{рег}}$ .

### I. Заполнение аэротенка

Во время заполнения аэротенк циклического действия работает в гидравлическом режиме реактора-смесителя. Нагрузка на активный ил во время заполнения принята постоянной. Для упрощения задачи разложение микробов активного ила и эндогенное дыхание не учитываются. Также не учитывается прирост ила во время цикла ввиду его незначительности.

По Ирвину [2]:

$$S = \frac{V_0^{\alpha_1/q}}{(V_0 + q t_{\text{зап}})^{\alpha_1/q}} S_e + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left[ 1 - \frac{V_0^{\alpha_1/q}}{(V_0 + q t_{\text{зап}})^{\alpha_1/q}} \right], \quad (2)$$

где

$$\alpha_1 = q + m_1 V_0 X_0, \quad (3)$$

$$\alpha_2 = q S_i. \quad (4)$$

Далее

$$S = f^{\alpha_1/q} S_e + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (1 - f^{\alpha_1/q}). \quad (5)$$

Скорость окисления определяется:

$$r = m_1 S_e X \quad (\text{мг/л} \cdot \text{сут}). \quad (6)$$

При этом

$$m_1 = 0,024 \frac{\rho}{S_e} \quad (\text{л/мг} \cdot \text{сут}),$$

где  $\rho$  - удельная скорость окисления (мг/г·ч).

Учитывая, что обычно  $\alpha_1/q_1 = 3-6$ , можно принять, что в момент заполнения (при достижении объема  $V$ ) в аэротенке

$$S = \frac{\alpha_2}{\alpha_1},$$

или

$$S = \frac{S_i}{1 + m_1 \frac{f \cdot V \cdot X_0}{q_{зан}}}. \quad (7)$$

Время заполнения:

$$t_{зан} = \frac{V(1-f)}{q_{зан}} \quad (\text{сут}). \quad (8)$$

## 2. Контактная аэрация

Аэротенк заполнен. Гидравлический режим: реактор - вытеснитель (во времени).

Время контактной аэрации:

$$t_{кон} = \frac{1}{m_2 X_0 f} \ln \frac{S}{S_e} \quad (\text{сут}). \quad (9)$$

## 3. Отстаивание (в состоянии покоя жидкости)

$$t_{отст} = 0,5 \text{ часа } (0,021 \text{ сут}).$$

## 4. Опорожнение

$$t_{он} = \frac{V(1-f)}{q_{он}} \quad (\text{сут}), \quad (10)$$

где  $q_{он}$  - производительность опорожнительного насоса.

При непрерывном притоке сточных вод

$$q_{он} > q_{зан}.$$

## 5. Регенерация активного ила

Гидравлический режим аэротенка: реактор - вытеснитель (во времени).

$$t_{\text{рег}} = \frac{1}{m_3 X_0} \ln \frac{S_e}{S_0} \quad (\text{II})$$

Скорость окисления в течение цикла  $t$  несколько убывает, однако для упрощения расчетов в первом приближении можно принять, что

$$m_1 \approx m_2 \approx m_3 = m.$$

При двух параллельно действующих аэротенках

$$t = 2t_{\text{зан}},$$

где

$$t_{\text{зан}} = t_{\text{кон}} + t_{\text{отсм}} + t_{\text{он}} + t_{\text{рег}} \quad (\text{I2})$$

После подстановки величины в уравнение (I2) получим:

$$\frac{V(1-f)}{q_{\text{зан}}} = \frac{1}{mX_0f} \ln \frac{S}{S_e} + 0,021 + \frac{V(1-f)}{q_{\text{он}}} + \frac{1}{mX_0} \ln \frac{S_e}{S_0} \quad (\text{I3})$$

Принимая  $q_{\text{он}} = 1,5q_{\text{зан}}$  и подставляя значение  $S$  из уравнения (7), будем иметь:

$$\frac{V(1-f)}{q_{\text{зан}}} = \frac{1}{mX_0f} \ln \frac{S_1}{S_e} \frac{1+m_1 \frac{fVX_0}{q_{\text{зан}}}}{S_e} + 0,021 + \frac{V(1-f)}{1,5q_{\text{зан}}} + \frac{1}{mX_0} \ln \frac{S_e}{S_0} \quad (\text{I4})$$

Рассмотрим конкретный пример расчета проточного и циклически действующего аэротенка соответственно по методике СНиП [3] и по изложенной методике.

Исходные данные:

расход сточных вод  $q_v = 100 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;

$S_i = 200 \text{ мг/л}$ ;  $S_e = 15 \text{ мг/л}$ ;  $S_0 = 12 \text{ мг/л}$ ;

$\rho = 6 \text{ мг/г}\cdot\text{ч}$ ;  $X_0 = 10000 \text{ мг/л}$ ;  $f = 0,33$ .

При очистке бытовых сточных вод в проточном аэротенке в режиме продленной аэрации (аэротенк-смеситель) можно рассчитать общее время аэрации и вторичного отстаивания:

$$t = \frac{S_i - S_e}{\rho X} + t_{\text{отсм}} = \frac{200 - 15}{6,3} + 1,5 = 11,8 \text{ ч}.$$

Объем сооружений:

$$V = \frac{100}{24} \cdot 11,8 = 49,2 \text{ м}^3.$$

В циклическом режиме, при одинаковых начальных условиях и дополнительных величинах

$$q_{оп} = 1,5 q_{зап}$$

и

$$m = 0,024 \frac{\rho}{S_e} = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ л/мг} \cdot \text{сут.}$$

Объем аэротенка составит  $V = 19,6 \text{ м}^3$ .

Используя два параллельно действующих аэротенка, получим

$$2V = 39,2 \text{ м}^3.$$

Сокращая время опорожнения, можно несколько уменьшить объем установки. Например, при

$$q_{оп} = 3 q_{зап}$$

$$V = 12,3 \text{ м}^3$$

$$2V = 24,6 \text{ м}^3.$$

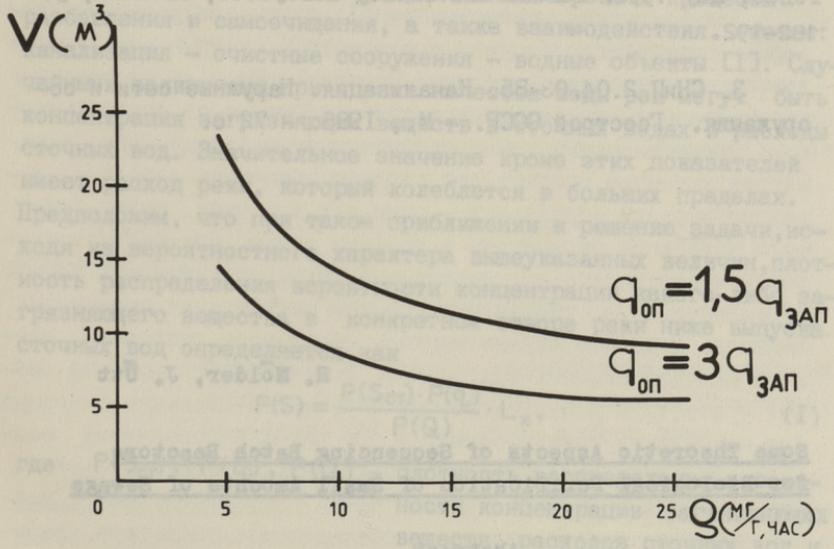


Рис. 2. Зависимость  $V = f(\rho)$

На рис. 2 показана зависимость объема аэротенка от скорости окисления и производительности опорожнительного насоса.

### Выводы

1. Изложенная теория расчета аэротенков циклического действия требует экспериментальной проверки.

2. Общий объем аэрационных сооружений в циклическом режиме меньше, чем в проточных условиях работы аэротенка.

#### Л и т е р а т у р а

1. М ё л ь д е р Х.А., Р е п и н Б.Н., Ю т т Я.П. Разработка однокамерных аэротенков-отстойников циклического действия для очистки малых количеств сточных вод // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1984. - № 569. - С. 65-70.

2. I r v i n e R.L., R i c h t e r R.O. Computer simulation and design of sequencing batch biological reactors // Proceeding of the 31-st Industrial Waste Conference, May 1976. Purdue University Lafayette, Indiana, p. 182-192.

3. СНИП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. Госстрой СССР. - М., 1986. - 72 с.

H. Mölder, J. Ütt

#### Some Theoretic Aspects of Sequencing Batch Reactors for Biological Purification of Small Amounts of Sewage

##### Abstract

The model of biological purification process in sequencing batch reactor has been given. The basic equations for different phases of the process have been developed.

### АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПДС ПРИ СБОСЕ СТОЧНЫХ ВОД В ВОДОЕМ

По сравнению с существующими методами прогнозирования качества воды водных объектов вероятностный подход прогнозирования позволяет более широко анализировать процессы разбавления и самоочищения, а также взаимодействия систем: канализация – очистные сооружения – водные объекты [1]. Случайными величинами при оценке качества воды рек могут быть концентрация загрязняющих веществ в сточных водах и расходы сточных вод. Значительное значение кроме этих показателей имеет расход реки, который колеблется в больших пределах. Предположим, что при таком приближении к решению задачи, исходя из вероятностного характера вышеуказанных величин, плотность распределения вероятности концентрации какого-либо загрязняющего вещества в конкретном створе реки ниже выпуска сточных вод определяется как

$$P(S) = \frac{P(S_{ст}) \cdot P(q)}{P(Q)} \cdot L_x, \quad (I)$$

где  $P(S_{ст})$ ,  $P(q)$ ,  $P(Q)$  – плотность распределения вероятности концентрации загрязняющих веществ, расходов сточных вод и расходов реки;

$L_x$  – оператор процесса смешения и самоочищения данного загрязняющего вещества в воде реки и определяется в зависимости от схемы спуска сточных вод [1].

В условиях берегового выпуска оператор смешения при плоской задаче решения уравнения турбулентной диффузии может быть определен по формуле [1]:

$$L_x = \frac{B\sqrt{v}}{\sqrt{\pi D_y x}} \cdot \frac{1}{\operatorname{erf}\left(\frac{B\sqrt{v}}{2\sqrt{D_y x}}\right)}, \quad (2)$$

где  $B, v$  - ширина и средняя скорость течения реки;  
 $D_y$  - коэффициент дисперсии в поперечном направлении течения;  
 $x$  - расстояние от створа выпуска до рассматриваемого (контрольного) створа реки.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi - \text{функция ошибок.}$$

Для нахождения зависимости (I) плотности распределения вероятностей расходов реки и параметров сточных вод определяются по осредненным данным. Расходы реки и их плотности распределения определяются достаточно точно по среднесуточным, среднедекадным или среднемесячным расходам. Для параметров качества сточных вод следует принимать довольно короткие периоды осреднения - один или два часа, ввиду большого колебания параметров в течение суток. При рассмотрении вероятности нескольких переменных следует учитывать период осреднения, т.е. промежуток времени регистрации переменных величин. В данном случае периоды осреднения расходов реки и параметров сточных вод разные. Это тот факт, который может привести к результатам, не отражающим реальную ситуацию. Для нахождения зависимости (I) при периоде осреднения расходов рек в пределе декады по сравнению параметров сточных вод можно принять, что  $Q = \text{const}$ . В этом случае рассматривается только влияние вероятностного характера параметров сточных вод на качество воды реки при ее постоянном расходе.

В практических ситуациях при наличии очистных сооружений сточных вод более обоснованно можно предполагать, что эти сооружения работают как осреднители и тогда без небольших погрешностей  $S_{\text{ст}} \cdot q = \text{const}$ . При нормальной работе очистных сооружений выражение  $S_{\text{ст}} \cdot q$  является постоянным в течение длительного времени. Это обстоятельство позволяет, не нарушая законов теории вероятности, рассматривать расходы реки как случайные величины при различных периодах осреднения. Из

этого следует зависимость между  $P$ -обеспеченностями концентрации  $S_p$  и стока  $Q_p$ :

$$S_p = \frac{S_{ст} \cdot q}{Q_{(1-P)}} \cdot L_x, \quad (3)$$

причем  $Q_p$  определяется на основе расходов, имеющих среднесуточный, декадный или месячный периоды осреднения. При таком определении обеспеченность качества воды реки  $S_p$  следует рассматривать также как величину в течение суток, декады или месяца. Следовательно, влияние нарушения санитарных требований качества воды реки (превышение ПДК) продолжается в течение использованного периода осреднения расходов.

В данном случае нашей задачей не является анализировать условия превышения ПДК в реке, а, исходя из заданного ПДК, определить степень очистки сточных вод и проанализировать влияние вероятностного характера расходов реки на степень очистки, соблюдая все благоприятные санитарные условия в реке. Для решения такой обратной задачи следует исходить из степени очистки сточных вод.

Степень очистки сточных вод в процентах обычно определяется по формуле

$$n = \frac{S_{ст} - S_{ст\text{нр}}}{S_{ст}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $S_{ст\text{нр}}$  — предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ сточной жидкости, которая обеспечивает требуемый ПДК в расчетном створе реки.

Иногда вместо  $S_{ст\text{нр}}$  более удобно использовать показатель так называемого предельно допустимого сброса (ПДС), который с учетом требований к составу и свойствам воды в водных объектах определяется для всех категорий водопользования как произведение расхода сточных вод на концентрацию загрязняющих веществ в сточной воде согласно формуле

$$\text{ПДС} = q \cdot S_{ст\text{нр}}. \quad (5)$$

В этом случае требуемая степень очистки выражается в виде

$$n = \left( 1 - \frac{\text{ПДС}}{q \cdot S_{ст}} \right) 100\%. \quad (6)$$

Обычно в инженерной практике, исходя из вышеприведенного рассуждения, решаются следующие две задачи.

Первая – определение степени очистки сточных вод, исходя из ПДК, процесса самоочищения и обеспеченности расхода воды в реке.

Вторая – определение при заданной степени очистки сточных вод вероятностных характеристик концентрации загрязняющих веществ в расчетном створе, учитывая обеспеченность расходов воды в реке и процесс самоочищения.

Совместное решение этих двух задач позволяет найти более экономичный вариант очистки и проанализировать санитарное состояние качества воды водного объекта.

Согласно "Правилам" [2] расчетным расходом реки принимается наименьший 95-процентный среднемесячный расход водоема. Решение поставленной нами задачи позволяет провести анализ с экономической точки зрения очистки сточных вод и дать обоснование для установления необходимых обеспеченностей расходов реки. С другой стороны, мы имеем вероятностные характеристики концентрации загрязняющих веществ в воде водоема в зависимости от обеспеченности расходов. Предлагаемый подход дает более общую картину системы: канализация – очистка – качество воды водоема. Кроме того, такой подход позволяет в косвенном виде установить вероятностные величины продолжительности загрязнения, т.е. определить вероятность превышения ПДК.

Установление "Правилами" в качестве расчетного расхода минимального среднемесячного расхода 95-процентной обеспеченности не имеет теоретического обоснования и этот подход принят как более простой метод для практиков. В статье [3] приводится анализ вероятностных характеристик минимальных среднесуточных, декадных, месячных, сезонных и годовых расходов, что позволяет анализировать влияние расходов водоема на качество воды и, с другой стороны, устанавливать теоретически более обоснованные расчетные величины.

Несмотря на тесную взаимосвязь поставленных нами задач, для конкретного решения рассмотрим все их в отдельности.

Первая задача: определение степени очистки сточных вод, учитывая ПДК и процесс самоочищения. Как видно ниже,

степень очистки при этом имеет тесную связь с расходами в реке, вероятностные характеристики которых определяются при помощи методов математической статистики.

Исходя из уравнений (2), (3) и (5) с учетом неконсервативности загрязняющих веществ и фонового загрязнения в условиях берегового выпуска, предельно допустимый сброс сточных вод определяется зависимостью

$$ПАС = (ПАК - S_{\phi}) Q_p \frac{\sqrt{\pi D_y x}}{B \sqrt{v}} \operatorname{erf} \left( \frac{B \sqrt{v}}{2 \sqrt{D_y x}} \right) \exp \left( \kappa_1 \frac{x}{v} \right), \quad (7)$$

где  $S_{\phi}$  - фоновая концентрация загрязняющих веществ в реке выше выпуска сточных вод;

$\kappa_1$  - коэффициент неконсервативности.

Степень очистки по формуле (6) в этих же условиях самоочищения следует определить как

$$n = \left[ 1 - \frac{ПАК - S_{\phi}}{q \cdot S_{ст}} Q_p \frac{\sqrt{\pi D_y x}}{B \sqrt{v}} \operatorname{erf} \left( \frac{B \sqrt{v}}{2 \sqrt{D_y x}} \right) \exp \left( \kappa_1 \frac{x}{v} \right) \right] \cdot 100\%. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) процесс смешения и самоочищения учитывается оператором

$$L_x^* = \frac{\sqrt{\pi D_y x}}{B \sqrt{v}} \operatorname{erf} \left( \frac{B \sqrt{v}}{2 \sqrt{D_y x}} \right) \exp \left( \kappa_1 \frac{x}{v} \right), \quad (9)$$

величиной, которая зависит от морфологии, гидравлических характеристик реки и расстояния  $x$  от створа выпуска до расчетного створа. На величину  $L_x^*$  влияют также условия выпуска сточных вод, т.е. местоположение выпуска в русле.

В этих условиях степень очистки сточных вод может быть определена по формуле

$$n = \left[ 1 - \frac{ПАК - S_{\phi}}{q \cdot S_{ст}} Q_p L_x^* \right] \cdot 100\%. \quad (10)$$

В вышеприведенных формулах величина  $Q_p$  является заданной  $P$ -обеспеченностью реки. Учитывая, что зависимость  $Q_p = Q_p(P)$ , т.е. зависимость обеспеченности  $Q_p$  от вероятности обеспеченности  $P$  нелинейна, то естественно зависимость  $n = n(P)$  будет также нелинейна. При практическом решении задач очистки сточных вод необходимо учитывать и стоимость очистки. Но анализ экономических соображений очистки выходит за пределы данной статьи.

Вторая задача: определение при заданной степени очистки сточных вод вероятностных характеристик концентрации загрязняющих веществ в расчетном створе.

Частично эта задача может быть решена на основе уравнения (3). Определяя оператор  $L_x$  по формуле (2), следует учесть, что здесь за основу принято консервативное вещество загрязнения. Неконсервативность учитывается умножением  $L_x$  на величину  $\exp(-k_1 \frac{x}{V})$ . При заданной степени очистки сточных вод  $P$ -квантиль распределения вероятности концентрации загрязняющего вещества в расчетном створе определяется формулой

$$S_P = \frac{q \cdot S_{ст}}{Q_{(1-P)}} \left(1 - \frac{n}{100}\right) L_x, \quad (II)$$

где  $n$  — степень очистки сточных вод в процентах.

Стоимость очистных сооружений, как правило, зависит от степени очистки и особенно дорогостоящей является глубокая очистка. В последнем случае сточная вода проходит несколько сооружений, чтобы обеспечить требуемое качество воды. По формуле (II) можно провести анализ влияния степени очистки на качество воды водоема в зависимости от обеспеченности расходов реки. Как в условиях первой задачи, так и здесь определенное значение имеет экономический фактор, на основе которого проводится сравнение отдельных вариантов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Основы прогнозирования качества поверхностных вод. — М.: Наука, 1982. — 182 с.

2. Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. № 166-74. — М., Минводхоз СССР, Минздрав СССР, Минрыбхоз СССР, 1975. — 38 с.

3. Л о д е Э.А. Гидрологические аспекты для определения предельно допустимого сброса (ПДС) (см. настоящий сб. с. 22-29).

Analysis of Factors Influencing the Limiting Permissible Discharges

Abstract

Guided by the necessity to guarantee water quality standards in most critical hydrological situations recommendations are elaborated for calculating limiting permissible discharges, taking into account the seasonal distribution of river discharges, the process of turbulent diffusion and the nonconservancy of pollutants.

УДК 628.394

Э.А. Лоде

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО СБРОСА (ПДС)

Максимальная концентрация  $S$  любого загрязняющего вещества в реке на определенном расстоянии  $x$  от створа выпуска, определяется по формуле [1]:

$$S = \frac{S_{ст} \cdot q}{Q} \cdot L_x, \quad (1)$$

где  $S_{ст}$  - концентрация веществ загрязнения сточной жидкости в створе выпуска;

$q$  - расход сточных вод;

$Q$  - сток реки;

$L_x$  - оператор процесса смешения и самоочистения [1].

При расчетах и проектировании очистных сооружений исходные параметры в уравнении (1) обычно принимаются постоянными, не изменяющимися во времени, но в действительности временная изменчивость всех трех параметров  $S_{ст}, q, Q$  в большинстве случаев значительна и весьма нерегулярна, неизбежно приводящая к значительной изменчивости концентрации  $S$  в рассматриваемом створе реки.

В определенных условиях произведение  $S_{ст} \cdot q$  в выражении (1) можно считать постоянной величиной [2]. В таком случае изменчивость  $S$  будет определяться только изменчивостью расхода воды в реке  $Q$ . При этом статистические характеристики  $S$  полностью определяются соответствующими статистическими характеристиками  $Q$ . Например, при функциональной зависимости (1)  $P$ -квантиль концентрации  $S_P$  определяется  $P$ -обеспеченностью расхода реки  $Q_P$

$$S_P = \frac{S_{ст} \cdot q}{Q_{1-P}} \cdot L_x, \quad (2)$$

а плотность распределения концентрации  $p_2(S)$  выражается через плотность распределения стока реки  $p_1(Q)$  [3],

$$p_2(S) = p_1\left(\frac{S_{ст} \cdot q \cdot L_x}{S}\right) \cdot \left(\frac{S_{ст} \cdot q \cdot L_x}{S^2}\right). \quad (3)$$

Известно, что режим малых рек легко подвергается любым изменениям зональных и азональных факторов, обуславливающих сток реки, и что наиболее неблагоприятные качества воды в реках создаются в меженные периоды реки. Поэтому наибольший интерес с точки зрения степени загрязнения рек представляют статистические характеристики именно минимальных расходов рек с различным временем осреднения (сутки, декада, 30 дней, месяц). Эти расходы в многолетнем разрезе генетически однородны и их можно рассматривать как случайные величины, значения которых являются независимыми случайными явлениями.

Для последующего статистического анализа составлены эмпирические ряды минимальных среднесуточных, декадных, 30-дневных и месячных расходов воды р. Кейла - г. Кейла, р. Пярну - д. Ооре, р. Пярну - д. Тахкузе, р. Выханду - пос. Химмисте и р. Выханду - г. Ряпина за весь период наблюдений. В результате предварительной статистической обработки был сделан вывод, что для решения поставленной задачи оправдан анализ рядов, составленных из минимальных значений по межнным периодам реки, т.е. по зимнему и летнему сезону. По составленным рядам рассчитаны средние многолетние расходы или нормы минимальных расходов сезона

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i,$$

где  $n$  - число лет наблюдений;

$Q_i$  - минимальный расход реки в  $i$ -ом году.

Среднеквадратические отклонения рядов

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

Распределения вероятностей минимальных расходов сравнивались с некоторыми теоретическими распределениями вероятностей, имеющими следующие плотности:

1. Нормальное распределение

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $\hat{a} = a_1 = \bar{x}$ ,  $\hat{\sigma} = b_1 = s$ .

2. Экспоненциальное распределение

$$f_2(x) = \frac{1}{\sigma} \cdot e^{-\frac{x-a}{\sigma}} \quad \text{при } x \geq a,$$

где  $\hat{a} = a_2 = \bar{x} - s$ ,  $\hat{\sigma} = b_2 = s$ .

3. Двухстороннее экспоненциальное распределение

$$f_3(x) = \frac{1}{2\sigma} \cdot e^{-\frac{|x-a|}{\sigma}},$$

где  $\hat{a} = a_3 = \bar{x}$ ,  $\hat{\sigma} = b_3 = \frac{s}{\sqrt{2}}$ .

4. Распределение Парето

$$f_4(x) = \alpha \cdot \beta \frac{1}{(\beta \cdot x)^{\alpha+1}} \quad \text{при } x > \frac{1}{\beta} \text{ и } \alpha > 1,$$

где  $\hat{\alpha}_{1,2} = \alpha_4 = 1 \pm \frac{\sqrt{s^2 + \bar{x}^2}}{s}$ ,  $\hat{\beta}_{1,2} = b_4 = \frac{s \pm \sqrt{s^2 + \bar{x}^2}}{\pm \sqrt{s^2 + \bar{x}^2} \cdot \bar{x}}$ .

5. Логнормальное распределение

$$f_5(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{при } x > 0,$$

где

$$\hat{a} = a_5 = \ln \frac{\bar{x}^2}{\sqrt{s^2 + \bar{x}^2}}, \quad \hat{b} = b_5 = \sqrt{\ln \frac{s^2 + \bar{x}^2}{\bar{x}^2}}.$$

6. Равномерное распределение

$$f_6(x) = \begin{cases} 0, & |x - \theta| > \frac{1}{2l} \\ 1, & |x - \theta| \leq \frac{1}{2l}, \end{cases}$$

где  $\hat{\theta} = a_6 = \bar{x}$ ,  $\hat{l} = b_6 = \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{s}$ .

7. Гамма распределение

$$f_7(x) = \frac{1}{\Gamma(\eta)} \cdot \lambda^\eta \cdot x^{\eta-1} \cdot e^{-\lambda x} \quad \text{при } x > 0,$$

где  $\hat{\lambda} = a_7 = \frac{\bar{x}}{s^2}$ ,  $\hat{\eta} = b_7 = \frac{\bar{x}^2}{s^2}$ .

Значения параметров  $a_1 - a_7$  и  $b_1 - b_7$ , входящие в перечисленные плотности распределения, оценены методом моментов.

Для установления степени соответствия эмпирических распределений с теоретическими из числа критериев согласия был применен критерий\* Пирсона  $\chi^2$ , главное преимущество которого заключается в том, что он может использоваться для оценки согласия эмпирических данных с любым законом распределения [4]. В качестве меры расхождения между эмпирическими данными и теоретической функцией распределения используется выражение

$$\chi^2 = N \sum_{m=1}^k \frac{(P_m^* - P_m)^2}{P_m},$$

где  $P_m^*$  - эмпирические вероятности в  $m$ -ом интервале;  
 $P_m$  - теоретические вероятности попадания  $Q_i$  в  $m$ -ый интервал;  
 $N$  - объем совокупности;  
 $k$  - число интервалов.

Число интервалов при каждом сопоставлении эмпирического распределения с теоретическим равнялось восьми ( $k=8$ ), причем теоретическая вероятность попадания значения минимального расхода в каждый интервал была постоянной. Результаты сопоставления эмпирических распределений с приведенными теоретическими распределениями на примере р. Кейла - г. Кейла за период с 1923 по 1982 гг., исходя из критерия  $\chi^2$ , приведены в таблице. В дальнейшем, в целях наилучшего описания минимальных стоков рек целесообразно расширять круг сопоставляемых теоретических распределений.

Для наглядности на рисунке приведено эмпирическое распределение минимальных среднедекадных значений расходов р. Кейла - г. Кейла за зимний сезон, рассчитанное по убывающему ряду по формуле

$$\frac{m}{n+1},$$

где  $m$  - порядковый номер члена ряда;  
 $n$  - число членов ряда.

С эмпирическим распределением сопоставлено гамма-распределение при  $\lambda = 2,05 \text{ с/м}^3$  и  $\eta = 3,50$ . Масштаб оси вероятности на графике выбран нелинейным, спрямляющим гамма-распределение и облегчающим экстраполяцию обеспеченностей.

Т а б л и ц а

Значения  $\chi^2$  и соответствующие уровни значимости для различных теоретических распределений реки Кейла - г. Кейла за период 1923 - 1982 гг.

	Год											
	Зима			Лето - осень			Год					
	МИН ср. д.	МИН ср. м.	МИН ср. с.	МИН ср. д.	МИН ср. м.	МИН ср. с.	МИН ср. д.	МИН ср. м.	МИН ср. с.	МИН ср. д.	МИН ср. м.	МИН ср. с.
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1. Нормальное распределение												
$\chi^2$	14,14	22,06	19,82	20,83	49,76	21,29	12,53	34,41	4,81			
R%	1,6	<0,1	0,17	<0,1	<0,1	<0,1	2,9	<0,1	45			
2. Экспоненциальное распределение												
$\chi^2$	7,15	4,70	14,60	7,78	21,53	10,70	4,48	16,88	10,11			
R%	22	46	1,3	18	<0,1	6,1	49	0,48	7,7			
3. Двустороннее экспоненциальное распределение												
$\chi^2$	9,63	21,06	20,79	15,52	67,33	15,17	13,70	40,68	4,69			
R%	9	<0,1	<0,1	0,9	<0,1	1,0	1,9	<0,1	46			
4. Распределение Парето												
$\chi^2$	46,47	19,42	52,41	16,06	12,67	18,42	16,18	11,65	19,34			
R%	<0,1	0,2	<0,1	0,7	2,7	0,3	0,7	4,2	0,3			

Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5. Логнормальное распределение									
$\chi^2$	11,58	5,05	13,71	6,97	14,61	5,12	2,45	12,83	4,19
R%	4,3	42,3	2,4	23,0	1,8	41,6	67,7	3,0	42,3
6. Равномерное распределение									
$\chi^2$	20,86	36,16	16,07	35,63	75,41	30,73	26,92	60,71	20,02
R%	<0,1	<0,1	0,7	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,15
7. Гамма распределение									
$\chi^2$	9,06	8,08	8,67	10,40	32,97	12,19	5,23	21,53	4,84
R%	II	16,7	13,3	6,9	<0,1	3,4	40	<0,1	44,6

R - уровень значимости в %.

График позволяет находить расходы разной обеспеченности  $Q_p$ , определяющие по формуле (2) P-квантили концентрации  $S_p$ .

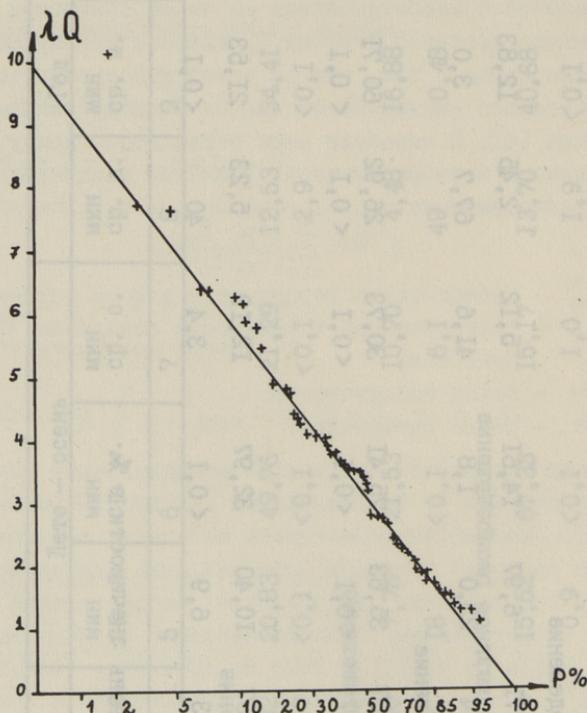


Рис. Эмпирические обеспеченности минимальных расходов р. Кейла - г. Кейла (x) и  $\chi$  - распределение (—) при  $\lambda = 2,05$  с/м,  $\eta = 3,50$ .

### Л и т е р а т у р а

1. Основы прогнозирования качества поверхностных вод. - М.: Наука, 1982. - 182 с.

2. Пааль Л.Л., Лоде Э.А. Анализ факторов, влияющих на ПДС при сбросе сточных вод в водоем (см. наст. сб. с. 15-21).

3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. - 576 с.

4. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. - Л.: Гидрометиздат, 1974. - 424 с.

E. Lode

Hydrological Aspects for Determining the  
Limiting Permissible Discharges

Abstract

The hydrological regime of small rivers depends on zonal and azonal factors determining the nature of seasonal distribution of river discharges. This circumstance should be considered when designing sewage treatment plants where the river serves as a receiver of sewage waters. The distribution of minimum seasonal river discharges (monthly, 30-day, decade, daily) are analysed statistically on the computer.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДГОТОВКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ, НАЛАДКИ РЕЖИМОВ, ДИСПЕТЧЕРСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ПОДАЧИ И  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ

В условиях постоянного роста объемов водопотребления, дефицита мощности водоприемных и очистных сооружений, ограниченной производительности источников водоснабжения наиболее актуальной задачей водоснабжения города является освоение автоматизированных систем управления технологическим процессом подачи и распределения воды (АСУ-ТП ПРВ). Система управления должна обеспечить надежное снабжение потребителей, снижение капитальных затрат на реконструкцию сооружений водопровода, сокращение потерь воды и расхода электроэнергии на ее подачу.

Для ряда городов СССР в настоящее время разработаны и внедряются диспетчерские системы управления информационного типа, которые позволяют контролировать процесс подачи и распределения воды, но не обеспечивают выбор оптимальных решений при проектировании развития, наладке режимов и оперативном управлении потокораспределением. Отсутствие оптимизации при принятии решений резко снижает эффективность диспетчерских систем управления. Вместе с тем модели и методы решения оптимизационных задач хорошо изучены [1], однако их использование целиком зависит от наличия модели для конкретной системы подачи и распределения воды (СПРВ). Таким образом, вопрос построения модели является основным при переходе от диспетчерской системы управления информационного типа к системе управления, автоматизирующей процесс принятия решений.

Известно, что модель вида (1), построенная на основе гидравлических аналогов двух законов Кирхгофа для электри-

ческих цепей, позволяет получить, при наличии достоверной и точной информации о структуре сети водоснабжения, гидравлических характеристиках участков, объемах и режимах водопотребления, адекватную картину потокораспределения.

$$\begin{aligned} A\bar{q} &= \bar{Q} \\ B\hat{S}\hat{Q}\bar{q} &= B\bar{H}, \end{aligned} \quad (I)$$

где  $A$  – матрица инцидентий узлов и участков сети;  
 $B$  – контурная матрица;  
 $\bar{q}$  – вектор расходов по участкам сети;  
 $\bar{H}$  – вектор активных напоров;  
 $\bar{Q}$  – вектор отборов в узлах сети;  
 $\hat{S}$  – диагональная матрица сопротивлений участков;  
 $\hat{Q}$  – диагональная матрица абсолютных величин расходов по участкам сети.

Однако большое число элементов СПРВ и изменчивость их состояний в процессе эксплуатации порождает трудности при сборе необходимой для построения модели информации. Кроме того, размерность модели, т.е. число зависимых и независимых переменных, входящих в уравнения модели, не позволяет использовать ее без предварительных преобразований для расчета управляющих воздействий на этапе диспетчерского управления СПРВ.

Указанные сложности, а также трудоемкость построения, идентификации, проверки адекватности модели объекта управления для разных этапов принятия решений требует разработки в составе АСУ–ТП ПРВ комплекса задач информационной подготовки. Основным содержанием информационной подготовки является сбор и обработка информации об изменениях, вносимых в СПРВ в процессе эксплуатации, автоматизация построения модели СПРВ, используемой для расчета оптимальных управляющих воздействий в ходе проектирования развития, наладки режимов и диспетчерского управления.

При разработке комплекса задач информационной подготовки в составе АСУ–ТП ПРВ использованы следующие основные положения:

- информационная база, описывающая СПРВ и потребителя, является общей для задач организационно-экономического характера и задач построения модели СПРВ;

- описание СРВ и потребителя осуществляется в форме, доступной работникам управления водопровода, что обеспечивает, при наличии запросно-поисковой системы, возможность корректировки информационной базы по мере изменений, вносимых в СРВ;

(1) - переход от информационной базы к модели СРВ автоматизирован.

Модель вида (I) строится поэтапно на основе гидравлических аналогов двух законов Кирхгофа. На первом этапе модель описывает сеть исходной структуры. Для ее построения используются две вспомогательные модели. Диагональная матрица гидравлических сопротивлений строится с использованием модели, описывающей изменение сопротивлений участков во времени, вектор отборов в узлах сети с использованием модели разбора воды потребителем. Параметры указанных вспомогательных моделей определяются на основе регулярных измерений и хранятся в информационной базе. Модель, построенная на первом этапе, служит для решения задач наладки сети и ее развития. По мере использования модели информационная база уточняется. На втором этапе сеть исходной структуры на основе анализа потокораспределения сжимается. Метод сжатия описан в работе [2]. В процессе сжатия обосновываются места размещения точек контроля напоров и арматуры для регулирования потоков в сети. Для сети сжатой структуры строится модель вида (I), параметры которой идентифицируются в соответствии с методом, предложенным в работе [3]. Под идентификацией подразумевается определение сопротивления для ветвей сети сжатой структуры. Полученная в результате сжатия и идентификации модель обладает значительно меньшей размерностью и после проверки на адекватность пригодна для расчета оптимальных управляющих воздействий в ходе диспетчерского управления.

Для определения параметров модели, описывающей динамику роста гидравлических сопротивлений и модели водоразбора потребителей, а также идентификации и проверки адекватности моделей, в составе системы информационной подготовки предусмотрена разработка приборного и программного обеспечения автоматизации измерений на сетях водоснабжения.

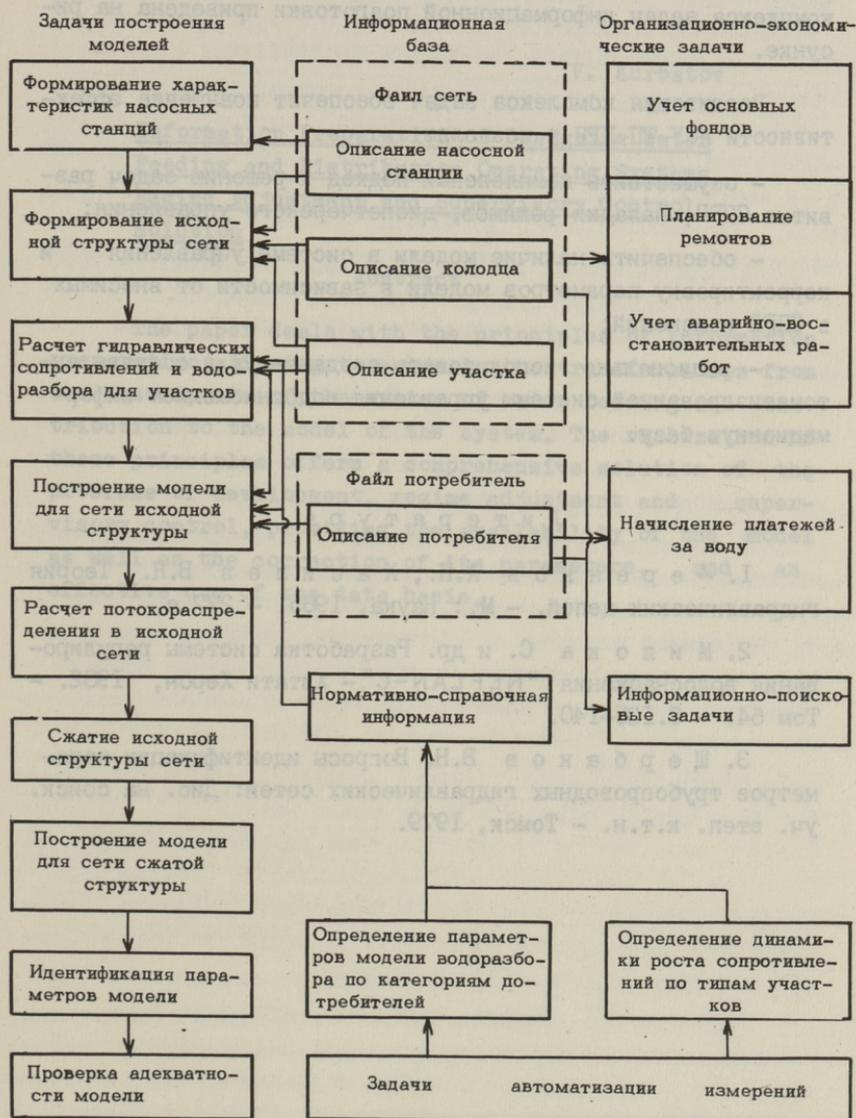


Рис. Схема комплекса задач информационной подготовки для проектирования, наладки режимов, диспетчерского управления действующих систем подачи и распределения воды.

Состав и схема информационных связей разрабатываемого комплекса задач информационной подготовки приведена на рисунке.

Реализация комплекса задач обеспечит повышение эффективности АСУ-ТП ПРВ и позволит:

- осуществить комплексный подход к решению задач развития СРВ, наладки режимов, диспетчерского управления;
- обеспечить наличие модели в системе управления и корректировку параметров модели в зависимости от вносимых в СРВ изменений;
- рационально использовать создаваемую в составе автоматизированной системы управления водоснабжением информационную базу.

#### Л и т е р а т у р а

1. М е р е н к о в А.П., Х а с и л е в В.Я. Теория гидравлических цепей. - М.: Наука, 1985. - 277 с.

2. М и я о к а С. и др. Разработка системы регулирования водоснабжения "NEFLAN-C". - Хитати Херон, 1982. - Том 64. - С.135-140.

3. Щ е р б а к о в В.Н. Вопросы идентификации параметров трубопроводных гидравлических сетей: Дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. - Томск, 1979.

V. Kurbatov

Information Preparation of Designing Water  
Feeding and Distribution Operating Systems,  
Regime Adjustment and Supervisory Control  
Solution

Abstract

The paper deals with the principles of information preparation allowing to automate the transformation from the description of the system of water feeding and distribution to the model of the system. The realization of these principles offers a comprehensive solution of the problems of development, regime adjustment and supervisory control, providing the availability of the model as well as the correction of its parameters, and an effective use of the data basis.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ИЗМЕРЯЕМОЙ ЖИДКОСТИ

При измерении расхода жидкостей с удельной электрической проводимостью менее  $10^{-6}$  См/м электромагнитным расходомером на результат измерения начинает оказывать влияние явление поляризации измеряемой жидкости.

Согласно источнику [1] явление поляризации измеряемой жидкости в электромагнитном преобразователе расхода можно представить в виде шунтирующего действия полезного сигнала внутренней емкостью преобразователя расхода, т.е. в выходном сигнале электромагнитного преобразователя расхода поляризация измеряемой жидкости приводит к линейным искажениям.

Поскольку степень линейных искажений выходного сигнала преобразователя расхода количественно находится в функциональной зависимости от электрических параметров измеряемой жидкости, то для обеспечения инвариантности передаточной функции преобразователя расхода в широком диапазоне электрической проводимости измеряемой жидкости требуется следящая коррекция передаточной функции.

Кашингом [1] предложен способ параллельной коррекции электромагнитного преобразователя расхода с помощью положительной обратной связи во входном усилителе измерительного устройства расходомера, обеспечивающей при соответствующей настройке глубины положительной обратной связи инвариантность показаний расходомера к электрическим параметрам измеряемой жидкости.

Физическая сущность способа параллельной коррекции передаточной функции электромагнитного преобразователя расхо-

да с помощью положительной обратной связи во входном усилителе измерительного устройства расходомера заключается в том, что действием цепи положительной обратной связи нейтрализуется шунтирующее действие внутренней емкости преобразователя расхода. При этом уменьшается эквивалентная входная проводимость измерительного устройства, что приводит к увеличению коэффициента шума входного усилителя и к уменьшению его помехоустойчивости. Последовательная коррекция передаточной функции электромагнитного преобразователя расхода этими недостатками не обладает.

Исходя из условия идеальной коррекции [2], последовательно с исходной системой включается корректирующая система с передаточной функцией, обратной передаточной функции исходной системы.

Для синтеза передаточной функции последовательной корректирующей системы требуется сначала определить передаточную функцию преобразователя расхода. Поскольку передаточная функция электромагнитного преобразователя расхода в широком диапазоне проводимостей измеряемой жидкости зависит от электрических параметров измеряемой жидкости, для автоматической следящей коррекции нужно непрерывно контролировать электрические параметры измеряемой жидкости. Для этого целесообразно использовать пробный сигнал. Ввиду симметричности электромагнитного преобразователя расхода и в целях упрощения выкладок достаточно рассмотреть только половину электрической эквивалентной схемы преобразователя [3], которая представлена на рисунке, на котором использованы следующие обозначения:

$U_c$  - напряжение полезного сигнала, генерируемое в активной зоне преобразователя расхода;

$Y_{ж}$  - эквивалентная проводимость измеряемой жидкости с учетом явления поляризации;

$Y_{ш1}$  - проводимость незаполненного преобразователя расхода;

$U_n$  - напряжение пробного сигнала;

$Y_n$  - внутренняя проводимость генератора пробного сигнала;

$Y_{ш2}$  - эквивалентная шунтирующая проводимость входной цепи измерительного устройства;

$U_1$  - напряжение на входе измерительного устройства.

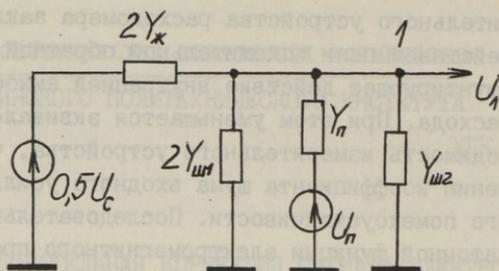


Рис. Электрическая эквивалентная схема электромагнитного преобразователя расхода.

Исходя из представленной на рисунке электрической эквивалентной схемы электромагнитного преобразователя расхода, передаточная функция для полезного сигнала

$$T_c = \frac{2Y_{ж}}{2Y_{ж} + 2Y_{ш1} + Y_n + Y_{ш2}}, \quad (1)$$

а передаточная функция для пробного сигнала

$$T_n = \frac{Y_n}{2Y_{ж} + 2Y_{ш1} + Y_n + Y_{ш2}}, \quad (2)$$

Передаточная функция для пробного сигнала при опорожненном канале преобразователя расхода

$$T_{n0} = \frac{Y_n}{2Y_{ш1} + Y_n + Y_{ш2}}. \quad (3)$$

Из формулы (1) видно, что в зависимости от комплексной проводимости измеряемой жидкости  $Y_{ж}$ , которая, как правило, является неизвестной величиной, коэффициент передачи полезного сигнала тоже является неизвестной величиной, зависящей от электрических параметров измеряемой жидкости.

Для синтеза выражения корректирующего коэффициента полезного сигнала при помощи функции (2) и (3) нужно их использовать таким образом, чтобы получить обратную к коэффициенту передачи полезного сигнала величину

$$\frac{1}{T_c} = \frac{2Y_{ж} + 2Y_{ш1} + Y_n + Y_{ш2}}{2Y_{ж}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что выражение для корректирующего коэффициента можно представить из двух неизвестных  $2Y_{ж}$  и  $2Y_{ш1} + Y_n + Y_{ш2}$ . Поскольку уравнения (2) и (3) содержат

эти же неизвестные, то задача сводится к решению системы двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными. Конечным решением задачи является не определение вышеуказанных проводимостей, а определение выражения для передаточной функции корректирующей системы, которое можно представить в виде

$$T_k = \frac{1}{1 - T_n / T_{по}} \quad (5)$$

При обработке полезного сигнала целесообразно использовать только синфазную с возбуждающим сигналом магнитным полем составляющую напряжения, которая формируется как  $U_c \cdot \text{Re}(T_c)$ . Из анализа передаточных функций полезного и пробного сигналов вытекает, что для коррекции достаточно сформировать коэффициент

$$K_k = \frac{1}{1 - \text{Re}(T_n / T_{по})} \quad (6)$$

Действительно, используя в выражениях передаточных функций (1), (2) и (3) новые обозначения, чтобы отдельно выделить активные и реактивные части входящих в выражения передаточных функций проводимостей,

$$T_c = \frac{a_1 + jb_1}{a_2 + jb_2} \quad (7)$$

где с учетом того, что все комплексные проводимости, изображенные на электрической эквивалентной схеме электромагнитного преобразователя расхода, имеют активно-емкостный характер.

$a_1 = 2g_{ж}$  - активная составляющая проводимости измеряемой жидкости;

$j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица;

$b_1 = \omega 2C_{ж}$  - емкостная составляющая проводимости измеряемой жидкости с учетом поляризации;

$\omega = 2\pi f$  - круговая частота возбуждения электромагнитного преобразователя расхода;

$f$  - частота возбуждения;

$a_2 = 2g_{ж} + 2g_{ш1} + g_n + g_{ш2}$  - активная составляющая суммарной проводимости узла I на электрической эквивалентной схеме преобразователя расхода при заполненной измеряемой жидкостью трубе;

$b_2 = \omega(2C_{ж} + 2C_{ш1} + C_n + C_{ш2})$  — емкостная составляющая суммарной проводимости узла I на электрической эквивалентной схеме преобразователя расхода при заполненной измеряемой жидкостью трубе;

Аналогично

$$T_n = \frac{Y_n}{a_2 + j b_2}, \quad (8)$$

$$T_{no} = \frac{Y_n}{(a_2 - a_1) + j(b_2 - b_1)}, \quad (9)$$

причем правомерность использования в знаменателе выражения передаточной функции пробного сигнала при опорожненной трубе преобразователя расхода  $T_{no}$  разностей  $a_2 - a_1$  и  $b_2 - b_1$  очевидна из выражений (1), (2), (3) и (7).

Поскольку, как следует из выражения (7)

$$\text{Re}(T_c) = \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2} \quad (10)$$

и из выражений (8) и (9)

$$\begin{aligned} 1 - \text{Re}(T_n/T_{no}) &= 1 - \text{Re} \left[ \frac{(a_2 - a_1) + j(b_2 - b_1)}{a_2 + j b_2} \right] = \\ &= 1 - \frac{(a_2 - a_1)a_2 + (b_2 - b_1)b_2}{a_2^2 + b_2^2} = \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

образование корректирующего коэффициента в виде

$$K_k = \frac{1}{1 - \text{Re}(T_n/T_{no})} \quad (12)$$

обеспечивает инвариантность выходного сигнала расходомера к электрическим параметрам измеряемой жидкости.

Таким образом, для последовательной коррекции сигнала электромагнитного преобразователя расхода достаточно измерить на рабочей частоте расходомера коэффициенты передачи пробного сигнала при опорожненной и заполненной трубе первичного преобразователя расхода, вычислить по формуле (12) корректирующий коэффициент и умножить его на синфазную составляющую полезного сигнала. При этом к величине входной проводимости измерительного устройства предъявляются менее жесткие требования, а соотношением сигнал/шум больше

по сравнению с методом параллельной коррекции сигнала электромагнитного преобразователя расхода.

При методе последовательной коррекции сигнала электромагнитного преобразователя расхода отпадает также необходимость двухкратной стендовой градуировки расходомера, как это требуется при методе параллельной коррекции.

#### Л и т е р а т у р а

1. C u s h i n g V. Electromagnetic flowmeter // The Review of Scientific Instruments. - 1965. - V. 36. - N 8. - P. 1142-1148.

2. К р а у с М., В о ш и н Е. Измерительные информационные системы. - М.: Мир, 1975. - 310 с.

3. Т о о м е т М. Исследование электромагнитного расходомера в широком диапазоне проводимостей измеряемой жидкости: Дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. - Таллинский политехнический институт, 1980.

M. Toomet

The Serial Correction of the Signal of the  
Electromagnetic Flow Transducer in a Wide  
Range of the Electrical Conductivity of  
Measured Fluid

#### Abstract

The synthesis of the transfer function of the serial correction system for the electromagnetic flow transducer is given, the derived adaptive correction algorithm ensures the output signal to be invariant for the electrical parameters of measured fluid. The pilot signal is used to follow the deviations of the transfer function of the electromagnetic flow transducer.

АНАЛИЗ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
ПРИ УСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

В работе [1] были приведены результаты изучения процесса турбулизации разгонного течения жидкости в цилиндрической трубе, полученные методом визуализации совместно с одновременным снятием процесса на кинолентку для последующего анализа. Продолжением этой работы приводим дополнительные результаты исследования разгонного течения на опытной установке по методике, описанной уже в работе [1].

Недостатки локальных, т.е. точечных измерений разных гидравлических процессов хорошо известны. Они не позволяют получить интегральную картину течения, поэтому трудно оценить роль турбулентных структур внутри потока и проследить за процессом турбулизации ламинарного течения. Методы визуализации позволяют уточнить, что происходит внутри потока, однако дают мало количественных данных. Поэтому в некоторых исследованиях используются оба метода одновременно (как, например, в работе [2]), чтобы получить и качественную и количественную оценку протекающих процессов внутри потока.

Трудности возникают при проведении визуализации быстротекающих течений, т.е. при больших скоростях течения или при больших ускорениях. Основные результаты экспериментов визуализации в трубах относятся к малоскоростным течениям.

На процесс турбулизации ламинарного течения влияют очень многие факторы. В нестационарных периодических течениях в цилиндрических трубах ламинарные и турбулентные режимы могут чередоваться. Согласно классическим экспериментальным исследованиям на плоской пластине [3, 4] турбулентность в пограничном слое возникает локализованно в

пространстве, образуя турбулентные пятна, которые при распространении вниз по потоку растут и, сливаясь, заполняют весь пограничный слой. На волнообразный характер возникновения и развития турбулентности в пограничном слое указано и в работах [5, 6]. В работе [1] были приведены результаты, указывающие, что и при разгонном течении в цилиндрической трубе появляются турбулентные пятна в виде волн, которые распространяются вниз по течению, растут и, сливаясь, заполняют все пространство.

#### Результаты исследования

Опытная установка и методика проведения опытов описаны в работе [1]. Рабочая труба имеет диаметр 50 мм, частота съемки 25 кадров в секунду. Съемка проводилась двумя синхронно работающими кинокамерами.

Из экспериментальных результатов момент начала турбулизации течения можно легко обнаружить по внезапному появлению мелкомасштабных турбулентных пятен, имеющих волнообразный характер по длине трубы (рис. 1).

Турбулентные образования увеличиваются в размерах и перемещаются вниз по течению до тех пор, пока в определенный момент весь поток не станет турбулентным. Скорость движения центра пятна приблизительно совпадает со средней скоростью течения.

Данный процесс перехода происходит при естественных условиях без искусственно добавленных возмущений. Причиной возникновения турбулентных пятен можно предположить возникновение волн Толмина-Шлихтинга по аналогии с плоской пластиной [5].

Опытные данные указывают на интересный факт, что расстояние между турбулентными пятнами в пределах граничных условий проведенных экспериментов уменьшается при увеличении начального давления в напорном баке.

При начальном давлении в баке  $p = 28,49$  нПа; расстояние между турбулентными пятнами  $L = 10-15$  см; при  $p = 14,24$  нПа расстояние  $L = 10-20$  см и при  $p = (7,12-4,75)$  нПа расстояние  $L = 30-60$  см (рис. 1).

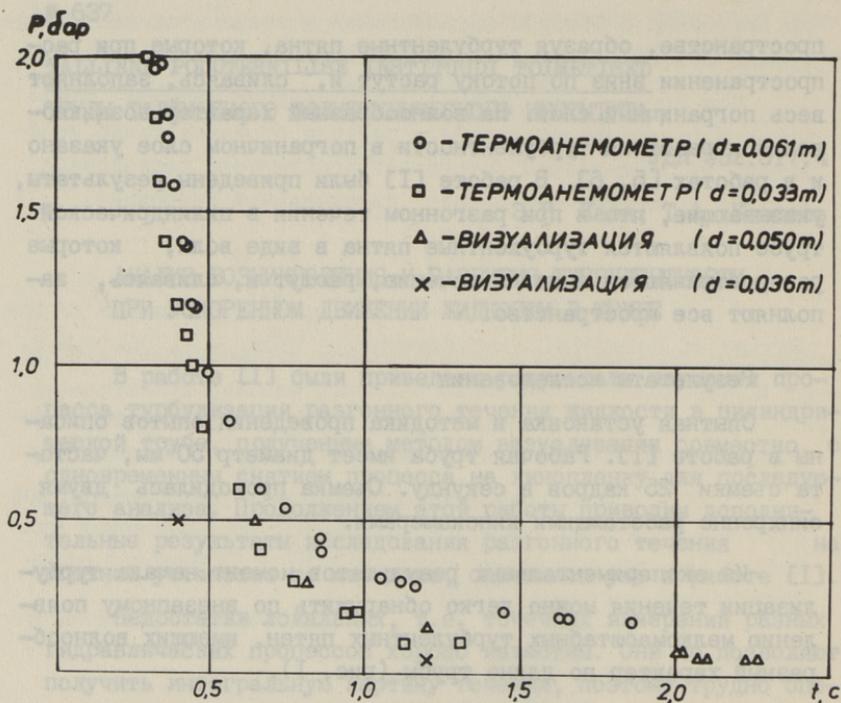


Рис. 1. Возникновение турбулентных пятен на дне трубы при разных начальных давлениях.

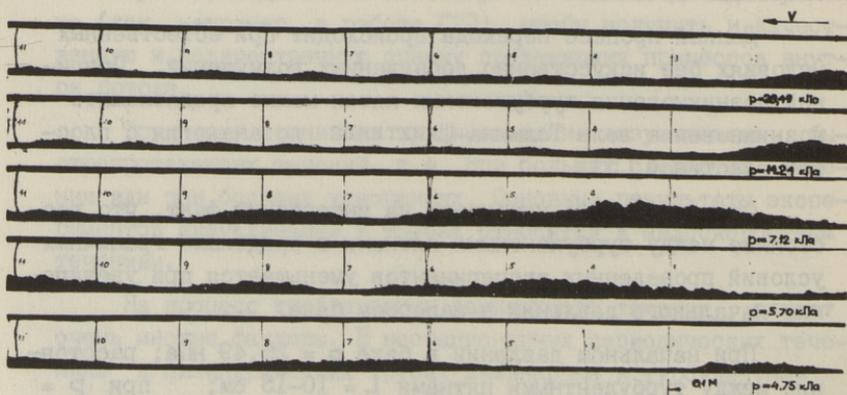


Рис. 2. Зависимость времени начала турбулизации разгонного течения от начального давления в напорном баке.

В лаборатории гидравлики ТПИ термоанемометрическим методом проведены измерения момента турбулизации разгонного течения в трубах с разными диаметрами [7]. На рис. 2 приведены результаты, указывающие момент начала турбулизации пристенной области в зависимости от начального давления в напорном баке для разных диаметров труб.

Результаты термоанемометрических измерений и визуализации хорошо совпадают и указывают на то, что процесс турбулизации при определенном давлении начинается раньше в более тонких трубах. Рост толщины пограничного слоя в более тонких трубах происходит быстрее. Этот результат совпадает с теоретическими выводами о начале инерции турбулентности, приведенными в работе [7].

### Л и т е р а т у р а

1. К а с к Э.Г., К о п п е л ь Т.А. Визуализация пограничного слоя при ускоренном движении жидкости в трубе // Тр. Таллинск. политехн. ин-та.—1987. — № 632. — С. 117-122.

2. К а т о Е., S u i t a М., К а в а м а т а М. Velocity distributions and intensity of turbulence of the unsteady pipe flows of constant acceleration and deceleration // Journal of the Faculty of Engineering Ibaraki University. — 1983. — V. 31. — P. 135-141.

3. E m m o n s H.W. The laminar-turbulent transition in a boundary layer: Part 1 // J. Aeronaut. Sci. — 1951. — V. 18. — N 7. — P. 490-498.

4. K l e b a n o f f P.S., T i d s t r o m K.D. Evolution of amplified waves leading to transition in a boundary layer with zero pressure gradient // NASA TN. — 1959. — D-195.

5. Л е р к е Р.И., М о р к о в и н М.В., Ф е г л е р А.А. Переход к турбулентному течению в колеблющихся пограничных слоях с неизменным направлением скорости // Теоретические основы инженерных расчетов. — 1976. — № 4. — С. 252-273.

6. К и н г В.С. Низкочастотные колебания большой амплитуды в пограничном слое // Ракетная техника и космонавтика. — 1966. — № 6. — С. 46-55.

7. Айнола Л.Я., Коппель Т.А., Ламп Ю.Ю., Лийв У.Р. О критериях перехода ламинарной формы течения в турбулентную при разгонном движении жидкости в круглой трубе // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1981. - № 505. - С. 17-29.

E. Kask, T. Koppel

Analysis of Generation and Development of  
Turbulence at Accelerated Fluid Flow in  
Circular Pipe

Abstract

The article deals with the process of the generation and development of the turbulence at the accelerated fluid flow in the circular pipe. The experimental results from the visualization of the flow have indicated that the process of the turbulization of the flow will start from the wavy appearance of the spots of the turbulence. These turbulent structures will spread downstream, enlarge, and merging in, fill all the flow. The wave-length of the spots depends on the initial pressure in the pressure tank.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО  
ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ  
В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Введение

Прямое численное моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости требует больших затрат машинного времени [1-3] и поэтому непрактично. Основания для такого вывода очевидны: одно из наиболее существенных свойств турбулентности (по крайней мере, при высоких числах Рейнольдса) — большая величина отношения наибольших характерных масштабов течения к наименьшим. Величина этого отношения определяет число степеней свободы, необходимое для численного представления поля течения (например, число узловых точек в конечно-разностных схемах) в любом направлении. Расчеты показывают, что применение прямого численного решения уравнения Навье-Стокса нецелесообразно даже при условии появления более быстродействующих ЭВМ. Кроме того, высокие требования предъявляются к ресурсам памяти ЭВМ.

Любое другое решение проблемы турбулентности основывается на эмпирической информации. При этом, насколько возможно, детально учитывается структура турбулентности в пограничном слое.

В результате анализа экспериментальных данных получена нелинейная система двух уравнений параболического типа для осредненной скорости и кинетической энергии турбулентности, которые решаются дивергентным конечно-разностным методом [4, 5] с итерациями.

В данной работе проведены расчеты нестационарного движения несжимаемой вязкой жидкости в трубе кругового сечения. Анализ результатов показал, что при наличии высоких градиен-

тов энергии турбулентности у стенки трубы в методике [4,5] имеет место большая потеря точности, что приводит к необходимости вести счет с двойным числом знаков. Найдена причина этого явления. Также выяснено, что методика [4, 5] имеет плохую сходимость, обусловленную аппроксимацией граничных условий у стенки трубы. Предложен метод аппроксимации граничных условий у стенки трубы, который значительно повышает скорость сходимости, приводит к выполнению равенства балансовых величин в системе и устраняет некоторые негативные счетные эффекты.

## I. Основные уравнения

Рассматривается нестационарное турбулентное движение несжимаемой жидкости в круглой цилиндрической трубе радиуса  $R$ . Вводятся предположения: существует осевая симметрия течения, течение статистически однородно вдоль оси трубы (осредненные значения компонент скорости и произведение их пульсаций не зависят от переменной  $x$ ), и тангенциальная компонента осредненной скорости равна нулю. Можно считать, что эти предположения выполняются для течения в круглой цилиндрической трубе на достаточно больших расстояниях от входного и выходного сечений.

Движение вязкой несжимаемой жидкости в трубе кругового сечения описывается нелинейной системой двух уравнений параболического типа [4]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} r (\nu + \varepsilon) \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\pi R^2} \left( \frac{dQ}{dt} - 2\pi R \nu \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R} \right) \quad (I.1)$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D \frac{\partial l}{\partial r} + \varepsilon \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - c D \frac{e}{L^2}, \quad (I.2)$$

где

$$Q(t) = 2\pi \int_0^R u r dr \quad (I.3)$$

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = \alpha Re_t \left[ 1 - e^{-\sigma_2 (Re_t)^2} + \sigma_3 (Re_t)^{\frac{1}{2}} e^{-\sigma_1 (Re_t)^2} \right] \quad (I.4)$$

$$D = \nu + m\varepsilon \quad (I.5)$$

$$\frac{L}{R} = l_0 + l_2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + l_4 \left(\frac{r}{R}\right)^4. \quad (\text{I.6})$$

Здесь  $t$  - время;

$\nu$  - кинематическая вязкость;

$u$  - средняя скорость вдоль оси трубы;

$\varepsilon$  - коэффициент турбулентной вязкости;

$D$  - суммарный коэффициент диффузии;

$L$  - масштаб турбулентности;

$e$  - турбулентная кинетическая энергия;

$r$  - координата, направленная по радиусу;

$m, c, \sigma_1, \sigma_2, l_0, l_2, l_4$  - константы.

Граничные условия:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial l}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0 \quad (\text{I.7})$$

$$u = e \quad \text{при } r = R \quad (\text{I.8})$$

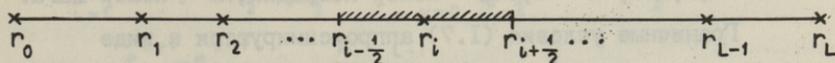
Начальные условия:

$$u = u(r), \quad e = e(r) \quad \text{при } t = 0 \quad (\text{I.9})$$

## 2. Конечно-разностные уравнения

Система (I.1)-(I.9) решается численно по неявной дивергентной конечно-разностной схеме [4, 5].

В области  $\Omega: \{0 \leq r \leq R, 0 \leq t \leq T\}$  по переменным  $r$  и  $t$  вводится неравномерная сетка. Шаг по времени  $\tau$  может меняться произвольным образом в течение счёта  $t^{n+1} = t^n + \tau$ , где  $n$  - номер шага по времени. На отрезке  $[0, R]$  строится неравномерная сетка по  $r$



где  $r_0 = 0$ ,  $r_L = R$ ,  $L+1$  - количество узловых точек.

Величины  $u, e$  вычисляются в узловых точках:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\tau} = \frac{S}{r_i(r_{i+1} - r_{i-1/2})} \left[ r_{i+1} (\nu + \varepsilon_{i+1/2}^n) \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_i^{n+1}}{r_{i+1} - r_i} - \right. \\ \left. - r_{i-1/2} (\nu + \varepsilon_{i-1/2}^n) \cdot \frac{u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}}{r_i - r_{i-1}} \right] + \frac{1-S}{r_i(r_{i+1/2} - r_{i-1/2})}.$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \left[ (\gamma + \varepsilon_{i+\frac{1}{2}}^n) \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{r_{i+1} - r_i} r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}} (\gamma + \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}^n) \cdot \right. \\
 & \cdot \left. \frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{r_i - r_{i-1}} \right] + \frac{s}{\pi R^2} \left[ \left( \frac{dQ}{dt} \right)^{n+1} - 2\pi R \gamma \frac{u_L^{n+1} - u_{L-1}^{n+1}}{r_L - r_{L-1}} \right] + \\
 & + \frac{1-s}{\pi R^2} \left[ \left( \frac{dQ}{dt} \right)^n - 2\pi R \gamma \frac{u_L^n - u_{L-1}^n}{r_L - r_{L-1}} \right].
 \end{aligned}$$

$$\frac{e_i^{n+1} - e_i^n}{\tau} = \frac{s}{r_i (r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}})} \left[ r_{i+\frac{1}{2}} (\gamma + m \varepsilon_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}) \frac{e_{i+1}^{n+1} - e_i^{n+1}}{r_{i+1} - r_i} - \right. \quad (2.1) \\
 \left. - r_{i-\frac{1}{2}} (\gamma + m \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}) \frac{e_i^{n+1} - e_{i-1}^{n+1}}{r_i - r_{i-1}} \right] + \frac{(1-s)}{r_i (r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}})}.$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \left[ r_{i+\frac{1}{2}} (\gamma + m \varepsilon_{i+\frac{1}{2}}^n) \frac{e_{i+1}^n - e_i^n}{r_{i+1} - r_i} - r_{i-\frac{1}{2}} (\gamma + m \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}^n) \cdot \right. \\
 & \cdot \left. \frac{e_i^n - e_{i-1}^n}{r_i - r_{i-1}} \right] + s \varepsilon_i^{n+1} \left( \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}}{r_{i+1} - r_{i-1}} \right)^2 - s c (\gamma + m \varepsilon_i^{n+1}) \cdot \\
 & \cdot \frac{e_i^{n+1}}{L^2} - (1-s) \left[ \varepsilon_i^n \left( \frac{u_{i+1}^n - u_{i-1}^n}{r_{i+1} - r_{i-1}} \right)^2 - c (\gamma + m \varepsilon_i^n) \frac{e_i^n}{L^2} \right], \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

$i = 1, 2, \dots, L - 1$ ,  $p$  - номер итерации,  $n$  - номер шага.

Граничные условия (1.7) аппроксимируются в виде

$$s \frac{u_1^{n+1} - u_0^{n+1}}{r_1 - r_0} + (1-s) \frac{u_1^n - u_0^n}{r_1 - r_0} = 0, \quad u_L^{n+1} = 0 \quad (2.3)$$

$$s \frac{e_1^{n+1} - e_0^{n+1}}{r_1 - r_0} + (1-s) \frac{e_1^n - e_0^n}{r_1 - r_0} = 0, \quad e_L^{n+1} = 0. \quad (2.4)$$

Система разностных уравнений решается методом прогонки

$$u_i^{n+1} = X_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} u_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} + Y_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \quad (2.5)$$

$$e_i^{n+1} = \bar{X}_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} e_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} + \bar{Y}_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}, \quad i = 0, 1, \dots, L-1. \quad (2.6)$$

Проводятся итерации по нелинейности на каждом временном шаге.

Неравномерная сетка по  $r$  введена с учетом того, что в области, примыкающей к стенке трубы, имеют место большие градиенты величин  $e, u$ ; в центре трубы производные искомым функций стремятся к нулю (экспериментальные данные). Предполагалось, что весовой коэффициент  $S$  в расчетной схеме будет  $\frac{1}{2} \leq S \leq 1$ .

Так как разностная схема (2.1)–(2.4) является дивергентной, то при суммировании разностных уравнений по всем счетным точкам  $i = 1, 2, \dots, L-1$  и по времени  $k = 0, 1, \dots, n$  получим баланс вычисляемых величин в системе разностных интегральных законов сохранения.

$$2\pi \sum_{i=1}^{L-1} u_i^{n+1} r_i (r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}}) = Q^{n+1} + 2\pi R \sum_{k=0}^n \tau \varepsilon_{L-\frac{1}{2}}^{k+1} \frac{u_L^{k+1} - u_{L-1}^{k+1}}{r_L - r_{L-1}}. \quad (2.7)$$

$$2\pi \sum_{i=1}^{L-1} e_i^{n+1} r_i (r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}}) = 2\pi R \sum_{k=0}^n \tau r_{L-\frac{1}{2}} (\nu + m \varepsilon_{L-\frac{1}{2}}^{k+1}) \cdot \frac{e_L^{k+1} - e_{L-1}^{k+1}}{r_L - r_{L-1}} + 2\pi \sum_{k=0}^n \tau \sum_{i=1}^{L-1} r_i (r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}}). \quad (2.8)$$

$$\cdot \left[ \frac{P_{n+1}}{\varepsilon_i} \left( \frac{P_{k+1}}{r_{i+1}} - \frac{P_{k+1}}{r_{i-1}} \right)^2 - c (\nu + m \varepsilon_i^{k+1}) \frac{e_i^{k+1}}{L^2} \right].$$

### 3. Результаты расчетов

Описанная выше методика реализована в программе TURB. По программе рассчитано нестационарное движение жидкости в

трубе кругового сечения:  $R = 0,0305$  м,  $\nu = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. В зависимости от способа задания расхода жидкости были сосчитаны пять вариантов.

Расход жидкости во всех вариантах задается в следующем виде:

$$\text{I вариант } Q = \begin{cases} 1,4605t, & \text{если } t < 0,01 \quad \tau = 0,001 \text{ (шаг по времени)} \\ 1,4605 \cdot 10^{-2}, & \text{если } t \geq 0,01 \end{cases}$$

$$\text{II вариант } Q = \begin{cases} 0,14605t, & \text{если } t < 0,1 \quad \tau = 0,0025 \\ 1,4605 \cdot 10^{-2}, & \text{если } t \geq 0,1 \end{cases}$$

$$\text{III вариант } Q = \begin{cases} 0,02921t, & \text{если } t < 0,5 \quad \tau = 0,005 \\ 1,4605 \cdot 10^{-2}, & \text{если } t \geq 0,5 \end{cases}$$

$$\text{IV вариант } Q = \begin{cases} 1,4605 \cdot 10^{-2}t, & \text{если } t < 1 \quad \tau = 0,01 \\ 1,4605 \cdot 10^{-2}, & \text{если } t \geq 1 \end{cases}$$

$$\text{V вариант } Q = \begin{cases} 0,73025 \cdot 10^{-2}t, & \text{если } t < 2 \\ 1,4605 \cdot 10^{-2}, & \text{если } t \geq 2 \quad \tau = 0,01. \end{cases}$$

Расчетный участок по радиусу разбивается на семь областей, вершины которых находятся в точках  $r_j$  ( $j = 0, 1, \dots, 7$ ). Число счетных интервалов в каждой области равно  $N_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 7$ )

$r_0$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$
0	0,4R	0,6R	0,7R	0,8R	0,9R	0,99R	R
$N_j$ :	10	10	20	20	25	40	50

Во всех пяти вариантах течение жидкости выходит на один и тот же стационарный режим. Профили осредненной скорости и энергии турбулентности на момент времени  $t = 2$  показаны на рис. 1 и 2 ( $\gamma = 1 - \frac{r}{R}$ ).

Влияние различной зависимости от времени на характер изменения параметров течения видно из рис. 3 и 4, где показана зависимость скорости от времени в различных точках сечения.

Во всех пяти вариантах баланс энергии выполнен с точностью до трех знаков ( $\approx 0,1$  %). Также был сосчитан вариант 6, где расход жидкости составлял  $Q = 1,4605t$ . Вариант 6 сосчитан до  $t = 1,5$ . При этом баланс интегральных величин для уравнения движения выполнялся с точностью до трех знаков (доли процента), а баланс энергии турбулентно-

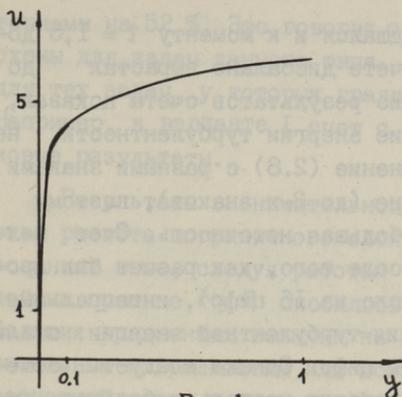


Рис. 1.

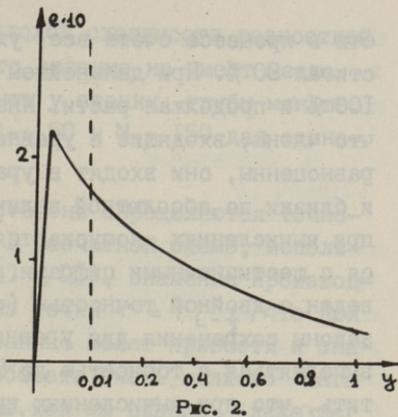


Рис. 2.

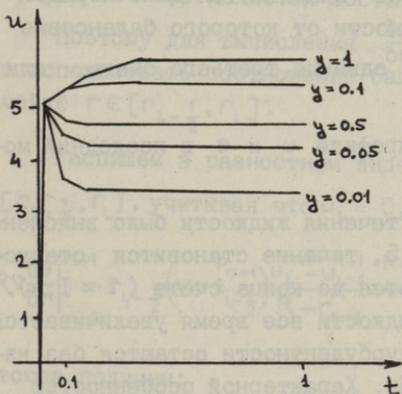


Рис. 3.

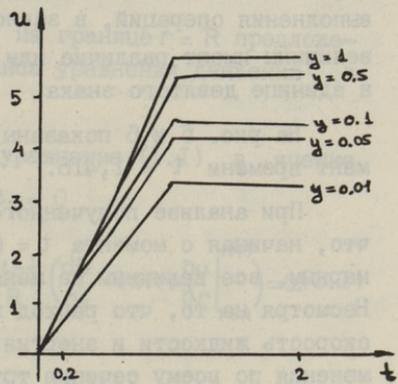


Рис. 4.

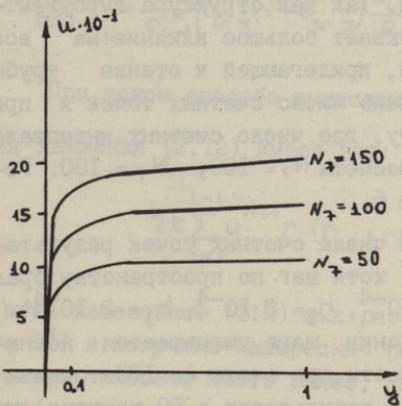


Рис. 5.

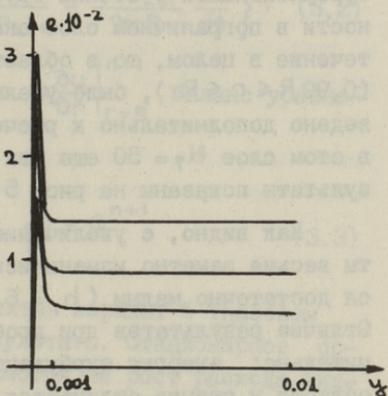


Рис. 6.

сти в процессе счета все ухудшался и к моменту  $t = 1,5$  достигал 30 %. При дальнейшем счете дисбаланс вырос до 100 % и продолжал расти. Анализ результатов счета показал, что члены, входящие в уравнение энергии турбулентности, не равноценны, они входят в уравнение (2.8) с разными знаками и близки по абсолютной величине (до 3-х знаков), поэтому при вычислениях допускается большая неточность. Счет велся с шестизначными цифрами. После того, как расчет был проведен с двойной точностью (число из 16 цифр), интегральные законы сохранения для уравнения турбулентной энергии стали выполняться с точностью до 8-и цифр. Однако следует отметить, что при вычислениях происходит настолько большая потеря точности, что на результат сказывается даже порядок выполнения операций, в зависимости от которого балансовые величины имеют различие или в единице третьего знака, или в единице девятого знака.

На рис. 5 и 6 показаны профили  $u$  и  $e$  в последний момент времени  $t = 1,416$ .

При анализе полученного течения жидкости было выяснено, что, начиная с момента  $t = 0,5$ , течение становится стационарным, все величины не меняются до конца счета ( $t \approx 1,5$ ). Несмотря на то, что расход жидкости все время увеличивается, скорость жидкости и энергия турбулентности остаются без изменения по всему сечению трубы. Характерной особенностью этого расчета является наличие больших градиентов энергии турбулентности у стенки трубы. Так как структура турбулентности в пограничном слое оказывает большое влияние на все течение в целом, то в области, прилегающей к стенке трубы ( $0,99R \leq r \leq R$ ), было увеличено число счетных точек и приведено дополнительно к расчету, где число счетных интервалов в этом слое  $N_7 = 50$  еще два расчета  $N_7 = 100$ ,  $N_7 = 150$ . Результаты показаны на рис. 5 и 6.

Как видно, с увеличением числа счетных точек результаты весьма заметно изменились, хотя шаг по пространству брался достаточно малым ( $h_1 = 6 \cdot 10^{-4}$ ,  $h_2 = 3 \cdot 10^{-4}$ ,  $h_3 = 2 \cdot 10^{-4}$ ). Отличие результатов при дроблении шага уменьшается незначительно: энергия турбулентности при счете со 100 точками в области у стенки отличается от результатов с 50 точками на 74 %, а результат со 150 точками отличается от счета со 100

точками на 52 %. Это говорит о плохой сходимости разностной схемы для задач данного типа. Это явление не имеет места для тех задач, у которых градиенты у стенки трубы меньше. Например, в варианте I счет с  $N_7 = 50$  и  $N_7 = 150$  дал одинаковые результаты.

Результаты в значительной степени определяются точностью расчета пограничного слоя. В расчетной схеме, использованной выше, следуя работам [4] и [5], значение производной на границе  $r = R$  сносилось из точки  $r = r_{L-\frac{1}{2}}$ , что при больших градиентах величин на границе может привести к значительным погрешностям или потребовать очень мелкого шага расчетной сетки у границы. Однако, как мы видели, даже шаг порядка  $10^{-4}$  не является достаточным.

Поэтому для вычисления  $\frac{\partial u}{\partial r}$  на границе  $r = R$  предложено использовать соотношение баланса уравнения движения в ячейке  $r \in [r_{L-\frac{1}{2}}, r_L]$ .

Распишем в разностном виде уравнение (I.1) в ячейке  $[r_{L-\frac{1}{2}}, r_L]$ , учитывая что  $u_L = 0$ ,  $\varepsilon_L = 0$

$$Rv \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R}^{n+1} - r_{L-\frac{1}{2}} \left( v + \varepsilon_{L-\frac{1}{2}}^{n+1} \right) \frac{u_L - u_{L-1}}{R - r_{L-1}} + \frac{R - r_{L-\frac{1}{2}}}{\pi R} \left( \frac{dQ}{dt} - 2\pi Rv \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R}^{n+1} \right) = 0. \quad (3.1)$$

Отсюда получим:

$$v \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R}^{n+1} = \frac{1}{r_{L-1}} \left\{ r_{L-\frac{1}{2}} \left( v + \varepsilon_{L-\frac{1}{2}}^{n+1} \right) \frac{u_L - u_{L-1}}{R - r_{L-1}} - \frac{R - r_{L-1}}{2\pi R} \frac{dQ}{dt} \right\}. \quad (3.2)$$

При таком способе вычисления  $v \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R}^{n+1}$  баланс уравнения движения (2.12) имеет вид:

$$2\pi \sum_{i=1}^{L-1} u_i^{n+1} r_i \left( r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}} \right) = Q^{n+1}. \quad (3.3)$$

С этим изменением (3.2) был рассчитан вариант 6 (назовем его 6<sup>x</sup>) и получены интересные результаты. Стационарное состояние, имевшее место ранее, несмотря на рост расхода жидкости, в варианте с изменениями (3.3) не наблюдается. Вместе с ростом расхода жидкости растет скорость жидкости и

энергия турбулентности. При счете варианта 6<sup>ж</sup> заданный расход жидкости равен рассчитанному в задаче расходу жидкости.

#### 4. Заключение

Анализ проделанных расчетов показал, что большое влияние на результаты оказывает способ расчета пограничного слоя. Так как уравнения (I.1), (I.2) и их коэффициенты являются эмпирическими, их вывод в значительной степени опирается на опытные данные, поэтому весьма важно уточнение постановки задачи, особенно в области пограничного слоя.

Выявленная в расчетах большая потеря точности является слабым местом в данной постановке задачи и требует устранения. Тот факт, что энергия турбулентности составляет лишь часть энергии диссипации также требует дальнейшего тщательного анализа.

#### Л и т е р а т у р а

1. Методы расчета турбулентных течений. Пер. с англ. / Под редакцией В. Калльмана. - М.: Мир, 1984.

2. Турбулентность. Принципы и применения. Пер с англ. / Под редакцией У. Форста, Т. Моулдена. - М.: Мир, 1980.

3. Б р э д ш о у П., С е б е с и Т., Ф е р н - г о л ь ц а Г.-Г. и др. Турбулентность - М.: Машиностроение, 1980.

4. В а с и л ь е в О.Ф., К в о н В.И. Неустановившееся турбулентное течение в трубе // Журнал прикл. мех. и тех. физики. - 1971. - № 6.

5. Б р а и л о в с к а я И.Ю., Ч у д о в Л.А. Решение уравнений пограничного слоя разностным методом: Вычислительные методы и программирование. - М.: Изд-во МГУ, 1962.

G. Dumkina

Étude numérique du mouvement turbulent  
non stationnaire d'un liquide visqueux  
dans un turbulaire cylindrique

Résumé

Calculs numériques du mouvement non stationnaire d'un liquide visqueux incompressible dans un turbulaire de la section ronde sont considérés dans ce travail.

L'analyse des calculs montre que les méthodes du type différences divisées qu'on utilise souvent pour solution des problèmes du mouvement considéré ont la convergence mauvaise à raison de la présence de l'énergie cinétique de turbulence de grand gradients près de la paroi de la tube. La cause de cet phénomène est trouvée.

On propose une méthode de l'approximation des conditions des limites près de la paroi qui résulte de l'augmentation essentielle de la vitesse de la convergence des calculs.

### МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАМКЯНИЯ УРАВНЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ

#### Введение

Обзорные статьи по замыканию дифференциальных уравнений для нестационарного течения приводятся в работах Константинова [1], Харченко [2] и Роди [3].

Турбулентные нестационарные течения в изотермической постановке описываются уравнением непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{u} = 0 \quad (1)$$

и уравнениями Навье-Стокса

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{u} + \frac{\nu}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} + \vec{F}, \quad (2)$$

где  $\vec{u}$  — вектор скорости;

$\rho$  — плотность жидкости;

$p$  — мгновенное значение статического давления;

$\nu$  — кинетическая вязкость жидкости;

$\vec{F}$  — внешние объемные силы.

Учитывая предложение Рейнольдса о рассмотрении мгновенных гидравлических характеристик в виде суммы средней и пульсационной составляющей

$$a_i = \bar{a}_i + a_i', \quad (3)$$

можем написать уравнения Рейнольдса, связывающие для несжимаемой жидкости средние характеристики течения с пульсационными

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= \bar{F}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_\alpha} - \overline{u_i' u_\alpha'} \right) \\ \frac{\partial \bar{u}_\alpha}{\partial x_\alpha} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где корреляции  $-u'_i u'_\alpha$  являются компонентами тензора турбулентных напряжений, действующими как дополнительные напряжения при переносе количества движения в турбулентном течении.

Суммированием уравнений (4) при  $i = j$  получим уравнение баланса кинетической энергии турбулентного течения  $K$

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i K + \frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_j u'_i} + \overline{p' u'_i} - \overline{u'_j \sigma'_{ij}}) = \overline{\rho u'_i F'_i} + \overline{p \bar{e}} - \overline{\rho u'_i u'_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}}, \quad (5)$$

где

$$\overline{p \bar{e}} = \overline{\sigma'_{ij} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} - \frac{\nu}{2} \sum_{i,j=1}^3 \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (6)$$

есть средняя удельная диссипация энергии пульсационного движения и

$$\sigma'_{ij} = \nu \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

является тензором вязких напряжений.

Предложение замыкания системы уравнений Рейнольдса с помощью только уравнений Навье-Стокса и уравнения непрерывности было сделано Келлером и Фридманом [4], вследствие чего получились уравнения для напряжений Рейнольдса

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\rho u'_i u'_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[ \overline{\rho u'_i u'_j u'_\alpha} + \overline{\rho u'_i u'_j u'_\alpha} + (\overline{p' u'_\alpha \delta_{j\alpha}} + \overline{p' u'_j \delta_{i\alpha}}) - \right. \\ \left. - (\overline{u'_i \sigma'_{j\alpha}} + \overline{u'_j \sigma'_{i\alpha}}) \right] = \overline{\rho u'_i F'_j} + \overline{\rho u'_j F'_i} + \overline{p' \sigma'_{ij}} - \\ - \left( \overline{\sigma'_{ij} \frac{\partial u'_i}{\partial x_\alpha}} - \overline{\sigma'_{ij} \frac{\partial u'_i}{\partial x_\alpha}} \right) - \left( \overline{\rho u'_i u'_\alpha \frac{\partial u'_j}{\partial x_\alpha}} + \overline{\rho u'_j u'_\alpha \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_\alpha}} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

В эти уравнения наряду со средними скоростями и давлениями входит теперь ряд новых неизвестных типа  $u'_i u'_j u'_\alpha$ . Число неизвестных в системе, содержащей уравнения Рейнольдса и уравнения для турбулентных напряжений, опять будет больше числа уравнений в системе. Осредняя соответствующие тождества и используя уравнения Навье-Стокса, можем получить уравнения для величин  $u'_i u'_j u'_\alpha$ , но в этих уравнениях появляются новые неизвестные.

Получаемая таким образом цепочка уравнений Келлера-Фридмана является теоретически совершенно точной, но на каждом этапе построения система остается незамкнутой. Для описания средних скоростей необходимо ввести в систему уравнений дополнительные данные из эксперимента двумя разными способами. Для сдвиговых течений используемые интегральные методы требуют ввода эмпирических данных таким образом, чтобы начальные уравнения в частных производных преобразовались в обыкновенные дифференциальные уравнения.

Методы поля требуют уточнения члена, характеризующего перенос турбулентным течением в любой точке потока, с помощью моделей турбулентности. Последние основываются на гипотезах о процессах турбулентности и требуют ввода экспериментальных данных в виде постоянных или функций, характеризующих влияние турбулентности на осредненное течение. В принципе создание уравнений переноса для большего числа турбулентных величин позволяет более реально описать разные сложные турбулентные процессы и повысить универсальность подобной модели. Поэтому модели турбулентности классифицируются по количеству уравнений переноса для турбулентных величин.

### Модели турбулентности

Модели так называемого нулевого порядка не содержат уравнений переноса для турбулентных величин. Все они основаны на гипотезе турбулентной вязкости и определяют ее величину прямо из эксперимента через эмпирическую формулу или связывают ее с распределением средней скорости.

Гипотеза о турбулентной вязкости предложена Бусси-неском [5] для замыкания уравнений Рейнольдса. Она связывает турбулентные касательные напряжения с градиентом средней скорости

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij}, \quad (9)$$

где  $\nu_t$  — турбулентная вязкость, которая противоположно молекулярной вязкости не является свойством жидкости, а сильно зависит от состояния турбулентности;

$k$  - кинетическая энергия турбулентности;

$\delta_{ij}$  - символ Кронекера.

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2}), \quad (10)$$

где

$$\overline{u_x'^2} = -2\nu_t \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \overline{u_y'^2} = -2\nu_t \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \overline{u_z'^2} = -2\nu_t \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (11)$$

Эти нормальные напряжения действуют как силы давления и поэтому, когда уравнение (9) используется для исключения  $u_i' u_j'$  из уравнения количества движения, второй член в левой части уравнения можно заменить давлением  $p + \frac{2}{3}k$ . Турбулентная вязкость вводится как скаляр, предполагая, что она является изотропной.

Гипотеза о пути перемешивания предложена Прандтлем [6] как первая полная модель турбулентности. Как и в кинетической теории газа предполагается, что турбулентная вязкость по аналогии с молекулярной вязкостью является пропорциональной характерной скорости турбулентного движения и пути перемешивания. Последний определяется как длина пути, пройденная элементарным жидким объемом при переходе из одного слоя в другой, полностью перемешиваясь и передавая свое количество движения:

$$u_x' \sim l' \frac{du_x}{dy}. \quad (12)$$

Соответственно для напряжений Рейнольдса

$$\tau_{yx} = -\rho \overline{u_x' u_y'} = -\rho l'^2 \left( \frac{d\overline{u_x}}{dy} \right)^2. \quad (13)$$

Принимая, что осредненная длина пути перемешивания

$$l = \sqrt{l'^2} = \kappa y, \quad (14)$$

где  $\kappa$  - универсальная постоянная. Карман [7] предложил гипотезу о локальном кинематическом подобии поля турбулентных пульсаций скорости, согласно которой

$$l = \kappa \frac{du_x}{dy} \left( \frac{d^2 \overline{u_x}}{dy^2} \right)^{-1}. \quad (15)$$

Для учета эффектов вязкости Ван Дрифт [8] предложил формулу

$$\ell = \kappa y \left[ 1 - \exp \left( - \frac{y(\tau_0/y)^{1/2}}{26 \nu} \right) \right], \quad (16)$$

где  $\tau_0$  — касательное напряжение на стенке.

В общем случае, используя предположение Прандтля и Буссинеска, турбулентную вязкость можно записать в следующем виде

$$\nu_t = \ell^2 \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right]^{1/2}. \quad (17)$$

Для общих течений Булеев [9] предложил определить значения средней длины пути перемешивания по следующей формуле:

$$\ell = \kappa \frac{1}{\pi} \int_D \frac{1}{\delta} d\Omega, \quad (18)$$

где  $\delta$  — расстояние от стенки до точки, по которой определяется длина пути;

$D$  — поперечное сечение канала.

Колмогоров [10] и Прандтль [11] предложили формулу для турбулентной вязкости

$$\nu_t = c_\mu \sqrt{k} L, \quad (19)$$

где  $c_\mu$  — эмпирическая константа;

$L$  — масштаб длины.

Для определения кинетической энергии турбулентности  $k$  решается соответствующее уравнение переноса, которое при больших числах Рейнольдса имеет вид:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ u_i' \left( \frac{u_i' u_i'}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right] - \bar{u}_i' u_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial \bar{u}_i'}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i'}{\partial x_j}. \quad (20)$$

В состоянии локального энергетического равновесия турбулентности это уравнение упрощается и из последних двух членов для сдвиговых слоев получается

$$\nu_t \cdot \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 = c_D \frac{k^{3/2}}{L}, \quad (21)$$

которая сравнима с формулой (17).

Учитывая (19), получим

$$\nu_t = \left(\frac{C_\mu}{C_D}\right)^{\frac{1}{2}} L^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|, \quad (22)$$

где  $C_D$  - другая эмпирическая постоянная.

Вместе со своими сотрудниками [12, 13] создали модель турбулентности, решая уравнение переноса для  $\overline{u'v'}$ , полученное преобразованием уравнения для переноса кинетической энергии. Предполагая, что в граничном слое

$$\frac{\overline{u'v'}}{k} = a \approx \text{const}, \quad (23)$$

уравнение для кинетической энергии превращается в уравнение для  $\overline{u'v'}$

$$\bar{u} \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} G \overline{u'v'} (\overline{u'v'}_{\max})^{\frac{1}{2}} - \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{(\overline{u'v'})^{\frac{3}{2}}}{L}, \quad (24)$$

где  $G$  - параметр в члене диффузии.

Джандал [14] полагает непостоянство отношения  $\frac{\overline{u'v'}}{k}$  для граничных слоев

$$\frac{\overline{u'v'}}{k} = f \left( \int_0^x \frac{\partial u_x}{\partial y} \frac{dx}{u} \right). \quad (25)$$

В моделях  $k - \varepsilon$  для выражения неізотропности турбулентной вязкости введена так называемая алгебраическая модель напряжений [15] вместо гипотезы турбулентной вязкости и формулы Колмогорова-Прандтля. Эта модель связывает индивидуальные напряжения  $\overline{u'_i u'_j}$  с градиентами средних скоростей, а  $k$  и  $\varepsilon$  через алгебраические выражения, упрощая этим уравнения переноса напряжений Рейнольдса. Для  $\overline{u'_i v'_j}$  получим уравнение

$$\overline{u'_i u'_j} = k \left[ \frac{2}{3} \delta_{ij} + \frac{(1-\gamma) \left( \frac{P_{ij}}{\varepsilon} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{P}{\varepsilon} \right)}{c_i + \frac{P}{\varepsilon} - 1} \right], \quad (26)$$

где

$$P_{ij} = -\overline{u'_i u'_l} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} - \overline{u'_j u'_l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \quad (27)$$

напряжение из-за действия  $\overline{u'_i u'_j}$ ;

$P$  - напряжение из-за кинетической энергии  $k$ ;

$\xi$  - скорость диссипации энергии;  
 $\gamma, c_1, c_3$  - эмпирические постоянные.

Это уравнение не содержит средств для определения  $K$ , поэтому оно применяется вместе с уравнением для кинетической энергии.

Все выше приведенные модели турбулентности относятся к стационарным течениям. Из-за отсутствия соответствующих эмпирических постоянных и отношений ими пользуются и при решении нестационарных турбулентных течений.

Применяя так называемый принцип квазистационарности, Васильев и Квон [16] предложили первую полную модель турбулентного нестационарного течения несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r (\nu + \nu_t) \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial r} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial z}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} = \nu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r D(Re_T) \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial r} \right] + \nu_t \left( \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial r} \right)^2 - \nu c_2 D(Re_T) \frac{\langle k \rangle}{L^2}. \quad (29)$$

По Глушко [17] турбулентная вязкость зависит от турбулентного числа Рейнольдса  $Re_T$

$$\frac{\nu_t}{\nu} = H(Re_T) \propto \frac{L \sqrt{k}}{\nu}, \quad (30)$$

где функция  $H(Re_T)$  имеет разный вид в зависимости от значения  $\frac{Re_T}{Re}$ ;  
 $\alpha$  - постоянная.

По экспериментальным данным Лауфера [18] для круглой трубы Васильев и Квон [16] предложили зависимость турбулентной вязкости в виде гладкой функции

$$\frac{\nu_t}{\nu} = \alpha Re_T \left[ 1 - \exp(\sigma_2 Re_T^{-2}) + \sigma_3 Re_T^{-1} \exp(-\sigma_1 Re_T^2) \right], \quad (31)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - постоянные.

В разных моделях в зависимости от зоны действия используемый суммарный коэффициент вязкости  $\nu_z$  получает следующие значения:

1) двухслойная модель Федяевского и Гиневского [19]

$$\nu_z = \nu \quad \text{при} \quad y \leq 11,5 \frac{\nu}{u_*}, \quad (32)$$

$$\nu_{\Sigma} = \nu_t = L^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right| \quad \text{при} \quad y > 11,5 \frac{y}{u_*}$$

2) трехслойная модель Охми и Усуй [20, 21]

$$\nu_{\Sigma} = \nu \quad \text{при} \quad y \leq 11,5 \frac{y}{u_*},$$

$$\nu_{\Sigma} \equiv \nu_t = 0,4 \left(1 - \frac{r}{R}\right) u_* R \quad \text{при} \quad 11,5 \frac{y}{u_*} < y \leq 0,175 R, \quad (33)$$

$$\nu_{\Sigma} \equiv \varepsilon = 0,7 u_* R \quad \text{при} \quad y > 0,175 R,$$

где  $u_*$  - динамическая скорость.

Масштаб турбулентности представляется в виде полинома

$$\frac{L}{R} = L_0 + L_2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + L_4 \left(\frac{r}{R}\right)^4, \quad (34)$$

где  $L_0, L_2, L_4$  - постоянные.

Эта формула аналогична зависимости Прандтля-Никурадзе для длины пути перемешивания [22].

В работах Еременко [23], Вагера и Лайтмана [24] масштаб турбулентности представляется в виде

$$\nu_t = \sqrt{\kappa} L. \quad (35)$$

### Выводы

Все модели турбулентности пытаются связывать неизвестные конвективные напряжения со средними характеристиками течения, используя классическую континуальную модель, основывающуюся на гипотезе Буссинеска о турбулентной вязкости с линейным обобщением Прандтля-Кармана или с другими модификациями. Все модели построены на некоторых допущениях, отклоняющихся от реальных условий течения. Поэтому наиболее важным является эмпирическое определение неизвестных параметров турбулентности для замыкания точных уравнений течения.

В настоящее время расчет нестационарных течений обычно производится в одномерной постановке, пренебрегая внутренней структурой потока и используя значения турбулентных характеристик, взятых из условий стационарного течения. По-

этому все модели турбулентности при расчете нестационарных течений нужно рассматривать как своего рода приближения.

Квазистационарный подход к решению задач неустановившихся течений жидкости является приемлемым только при воздействии небольших сил инерции, вызываемых ускорением. Теоретические решения этой задачи сопоставлены с экспериментальными данными из работ Шахина [25], Букреева и Шахина [26], Кирмсе [27] и Хартнера [28]. На их основе можно заключить, что при заданных условиях эксперимента ( $Re \geq 10^5$  и слабые пульсации) данный подход дает удовлетворительные результаты при распределении средних скоростей и определении кинетической энергии в ядре потока, но согласуется плохо с экспериментальными данными в граничных слоях. В квазистационарной модели коэффициент трения мало зависит от локальных сил инерции, возникающих при нестационарном турбулентном течении.

По экспериментальным данным [29, 30, 31] выяснено, что под влиянием инерционных сил локальные характеристики в нестационарных турбулентных потоках отличаются от таковых в стационарных течениях. Поэтому следовало бы учитывать и другие составляющие тензора напряжений Рейнольдса.

## Л и т е р а т у р а

1. К о н с т а н т и н о в С.В. Замкнутое описание неустановившегося турбулентного течения реальной жидкости в трубе / Моск. ин-т нефтехим. и газопром. - М., 1976, № 956-76.-С. I-10 (Деп. в ВИНТИ).

2. Х а р ч е н к о А.М. Современный анализ нестационарных случайных процессов и возможность его применения к явлениям нестационарной турбулентности / Донецкий гос.ун-т. - 1974. - № 775. - 22 с. (Деп. в ВИНТИ).

3. R o d i W. Turbulence models and their application in hydraulics // Proc. of IAHR. - 1980. - 103 p.

4. K e l l e r L., F r i d m a n n A. Differentialgleichungen für die turbulente Bewegung einer kompressiblen Flüssigkeit // Proc. 1st Int. Congress Appl. Mech. - Delft. - 1924. - P. 395-405.

5. B o u s s i n e s q I.V. Théorie de l'écoulement

- turbulent // *Mém. pres. Acad. Sci. - Paris*, - 1877. - XXIII.
6. P r a n d t l L. Über die ausgebildete Turbulenz // *ZAMM*. - 1925. - 5. - P.136.
7. V o n K a r m a n Th. Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz // *Nach. Ges. Wiss. - Göttingen: Math. Phys. Klasse*. - 1930. - S. 58.
8. V a n D r i e s t E.R. On turbulent flow near a wall // *J. Aero. Sci.* - 1956. - 23. - P. 1007.
9. Б у л е е в Н.И. Теоретическая модель механизма турбулентного обмена в потоках жидкости: Теплопередача. - М.: Изд. АН СССР, 1962.
10. К о л м о г о р о в А.Н. Уравнение турбулентного движения несжимаемой жидкости // *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* - 1942. - № 1-2. - С. 56.
11. P r a n d t l L. Über ein neues Formelsystem für die ausgebildete Turbulenz // *Nachr. Acad. Wiss. - Göttingen: Math. Phys. Klasse*, 1945. - P. 6.
12. B r a d s h a w P., F e r i s s D.H., A t w e l l N.P. Calculation of boundary layer development using the turbulent energy equation // *J. Fluid Mech.* - 1967. - 28. - P. 593-616.
13. B r a d s h a w P., F e r i s s D.H. Application of a general method of calculating turbulent shear layers // *J. Basic Eng., Trans. ASME. - Serie D.* - 1973. - 94. - P.345
14. J e a n d a l D. Une approche phenomenologique des écoulements turbulents inhomogènes: Ph. D. Thesis, Univ. Claude Bernard de Lyon, 1976.
15. R o d i W. A new algebraic relation for calculating the Reynolds stresses // *ZAMM* 56. - T219-T221. - 1976.
16. В а с и л ь е в О.Ф., К в о н В.И. Неустановившееся турбулентное течение в трубе // *Изв. АН СССР. Журнал ПМТФ.* - 1971. - № 6. - С. 132.
17. Г л у ш к о Г.С. Турбулентный пограничный слой на плавкой пластине в несжимаемой жидкости // *Изв. АН СССР. Механика.* - 1965. - № 4. - С. 12-23.

18. L a u f e r J. The structure of turbulence in fully developed pipe flows / NACA Rep. - 1954. - 1174. - P. 1-18.

19. Ф е д я е в с к и й К.К., Г и н е в с к и й А.С. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. - Л.: Судостроение, 1973. - 256 с.

20. O h m i M., U s u i T. Pressure and velocity distributions in pulsating turbulent pipe flow: Part 1 // Theoretical Treatments, Bull. ISME. - 1976. - V. 19. - N 129. - P. 307-317.

21. O h m i M., U s u i T., Т а н а к а О., Т о у а м а М. Pressure and velocity distributions in pulsating turbulent pipe flow: Part 2 // Bull. ISME. - Aug. 1976. - V. 19. - N 134. - P. 951-957.

22. Ш л и х т и н г Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - VII с.

23. Е р е м е н к о Е.В. Расчет кинематических характеристик турбулентного потока при неустановившемся движении: Турбулентные течения. - М: Наука, 1970. - С. 49-58.

24. В а г е р В.Г., Л а й т м а н н Д.Л. Структура турбулентного потока в трубе // Изв. АН СССР. МЖТ. - 1968. - № 4. - С. 89-92.

25. Ш а х и н В.М. Проверка некоторых математических моделей неустановившегося турбулентного течения в трубе. Динамика сплошной среды / СО АН СССР. - 1976. - Вып. 27. - С. 152-158.

26. Б у к р е е в В.И., Ш а х и н В.М. Экспериментальное исследование энергии турбулентности при неустановившемся течении в трубе. Динамика сплошной среды / СО АН СССР. - 1975. - Вып. 22. - С. 65-74.

27. K i r m s e R. Experimentelle Untersuchungen pulsierenden turbulenter Wasserströmungen in geraden Kreisrohr unter Verwendung eines Laser-Doppler Anemometers: Diss. Dokt. Ing. Tech. Universität. - München, 1976. - 110 S.

28. H a r t n e r E. Turbulenzmessung in pulsierenden Rohrströmung: Diss. Doc. Ing., Techn. Universität. - München, 1984.

29. Maruyama T., Kuribayashi T., Mizushina T. The structure of the turbulence in transient pipe flow // J. Chem. Eng. of Japan. - 1976. - V. 9. - N 6.

30. Maruyama T., Kato Y., Mizushina T. Transition to turbulence in starting pipe flow // J. Chem. Eng. of Japan. - 1978. - V. 11. - N 5.

31. Iguchi M., Ohmi M. Turbulent accelerating and decelerating pipe flows in quasi-steady motion // Techn. Reports of the Osaka Univ. - March 1983. - V. 33. - N 1696. - P. 97-106.

R. Ruubel

**Turbulent Stress Models to Close the Set of Equations for Unsteady Flow**

**Abstract**

A survey is given of existing theoretical and semi-empirical turbulent stress models for closing the set of equations for unsteady flows. It was noted that a quasi-steady model does not describe the local turbulent variables of unsteady flow correctly.

## С о д е р ж а н и е

1.	Л.Л. Пааль. Итоги научно-исследовательских работ на кафедре санитарной техники за 50 лет....	3
2.	Х.А. Мельдер, Я.П. Ютт. Некоторые теоретические вопросы работы малых азротенков циклического действия.....	9
3.	Л.Л. Пааль, Э.А. Лоде. Анализ факторов, влияющих на ПДС при сбросе сточных вод в водоем.....	15
4.	Э.А. Лоде. Гидрологические аспекты для определения предельно допустимого сброса (ПДС).....	22
5.	В.А. Курбатов. Информационная подготовка решения задач проектирования, наладки режимов, диспетчерского управления действующих систем подачи и распределения воды.....	30
6.	М.Э. Тоомет. Последовательная коррекция сигнала электромагнитного преобразователя расхода в широком диапазоне электрической проводимости измеряемой жидкости.....	36
7.	Э.Г. Каск, Т.А. Коппель. Анализ возникновения и развития турбулентности при ускоренном движении жидкости в трубе.....	42
8.	Г.В. Думкина. Численное исследование нестационарного турбулентного течения вязкой жидкости в цилиндрической трубе.....	47
9.	Р.Ю. Руубел. Модели турбулентных напряжений для замыкания уравнений нестационарного течения	58







№ 637

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Санитарная техника XIX

УДК 628.34

Итоги научно-исследовательских работ на кафедре санитарной техники за 50 лет. Пааль Л.Л. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 3-8.

В статье приводятся основные результаты научно-исследовательских работ, выполненных на кафедре за время ее существования. Основными направлениями являются следующие: очистка природных и сточных вод, прогнозирование и регулирование качества воды водных объектов, неустановившееся течение жидкости в напорных трубопроводах и др.

Библ. наименований - 17.

УДК 628.356

Некоторые теоретические вопросы работы малых аэротенков циклического действия. Мельдер Х.А., Ют Я.П. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 9-14.

В статье приводится модель процесса биоочистки аэротенка циклического действия. Рассматриваются закономерности отдельных фаз процесса. Дается гидравлическая характеристика системы.

Рисунков - 2, библ. наименований - 3.

УДК 628.394

Анализ факторов, влияющих на ПДС при сбросе сточных вод в водоем. Пааль Л.Л., Лоде Э.А. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 15-21.

Руководствуясь необходимостью обеспечения норм качества воды при наиболее неблагоприятных гидрологических ситуациях, в статье дана рекомендация для расчета предельно допустимого сброса (ПДС), учитывая сезонное распределение расходов реки, процесс турбулентной диффузии и неконсервативность загрязняющих веществ.

Библ. наименований - 3.

УДК 628.394

Гидрологические аспекты для определения предельно допустимого сброса (ПДС). Лоде Э.А. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 22-29.

Гидрологический режим малых рек обуславливается местными зональными и азональными факторами, определяющими характер сезонного распределения расходов воды. Это обстоятельство необходимо учитывать и при проектировании очистных сооружений при использовании реки в качестве приемника сточных вод. В статье показан подход определения сезонных показателей расхода воды на основе фактических наблюдаемых рядов. Даны результаты статистического анализа распределения минимальных сезонных расходов воды (месячные, 30-ти дневные, декадные, суточные), выполненного на ЭВМ.

Таблиц - I, рисунков - I, библ. наименований - 4.

Информационная подготовка решения задач проектирования, наладки режимов, диспетчерского управления действующих систем подачи и распределения воды. Курбатов В.А. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 30-35.

В статье изложены принципы информационной подготовки, позволяющие автоматизировать переход от описания системы подачи и распределения воды, принятые в эксплуатирующих организациях, к модели системы. Реализация принципов позволяет осуществить комплексное решение задачи развития, наладки, диспетчерского управления; обеспечить наличие модели и корректировку ее параметров; рационально использовать информационную базу.

Рисунков - I, библиографических наименований - 3.

Рисунков - I,

Последовательная коррекция сигнала электромагнитного преобразователя расхода в широком диапазоне электрической проводимости измеряемой жидкости. Тоомет М.Э. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 36-41.

Описывается процедура синтеза передаточной функции последовательной корректирующей системы электромагнитного преобразователя расхода с целью получения инвариантного к изменениям электрических параметров жидкости выходного сигнала. Коррекция сигнала с помощью предлагаемого алгоритма имеет следящий характер; для слежения за изменениями передаточной функции электромагнитного преобразователя расхода используется пробный сигнал.

Рисунков - I, библиографических наименований - 3.

УДК 532.517.4

Анализ возникновения и развития турбулентности при ускоренном движении жидкости в трубе. Каск Э.Г., Коппель Т.А. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 42-46.

В статье рассматривается процесс возникновения и развития турбулентности при разгонном движении жидкости в цилиндрической трубе. Экспериментальные результаты, полученные методом визуализации, показывают, что процесс турбулизации начинается с появления турбулентных пятен в виде волн. Эти турбулентные структуры распространяются вниз по течению, растут и, сливаясь, заполняют все течение. Длина волн зависит от начального давления в напорном баке.

Рисунков - 2, библиографических наименований - 7.

УДК 532.517.4

Численное исследование нестационарного турбулентного течения вязкой жидкости в цилиндрической трубе. Думкина Г.В. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 47-57.

В работе проведены численные расчеты нестационарного движения несжимаемой вязкой жидкости в трубе кругового сечения. Анализ результатов показал, что при наличии высоких градиентов кинетической энергии турбулентности у стенки трубы в общепринятой конечно-разностной дивергентной схеме имеет место большая потеря точности, что приводит к нарушению баланса энергии в системе. Поэтому необходимо вести счет с двойным числом знаков. Найдена причина этого явления.

Показано, что общепринятый метод имеет плохую сходимость, обусловленную аппроксимацией граничных условий у стенки трубы. Предложен метод аппроксимации граничных условий, который значительно повышает скорость сходимости,

приводит к выполнению равенства балансовых величин в системе и уточняет некоторые негативные счетные эффекты (наступление стационарного режима при увеличении расхода жидкости).

Рисунков - 6, библиографических наименований - 5.

УДК 532.54.013.2

Модели турбулентных напряжений для замыкания уравнений нестационарного течения. Руубел Р.Ю. - Труды Таллинского политехнического института, 1987, № 637, с. 58-69.

В статье рассматриваются вопросы применения математических моделей, описывающих турбулентное нестационарное течение. Указывается, что применение квазистационарного подхода при замыкании уравнений движения с помощью турбулентных характеристик стационарного потока не всегда приводит к удовлетворительным результатам.

Библиографических наименований - 31.

приводят и выносятся в виде осадка в отстойники. В отстойниках оседает осадок, который выносятся в отстойники. В отстойниках оседает осадок, который выносятся в отстойники.

Копаль Т. А. - Труды Ташкентского политехнического института, 1967, № 6, с. 60-61.

В статье рассматривается процесс возникновения и развития турбулентности при разном движении жидкости в гидравлической трубе. Экспериментальные результаты, полученные методом измерения скорости течения, позволяют выявить закономерности возникновения турбулентности для различных значений скорости течения. Приведены результаты измерения скорости течения в гидравлической трубе. Экспериментальные результаты, полученные методом измерения скорости течения, позволяют выявить закономерности возникновения турбулентности для различных значений скорости течения.

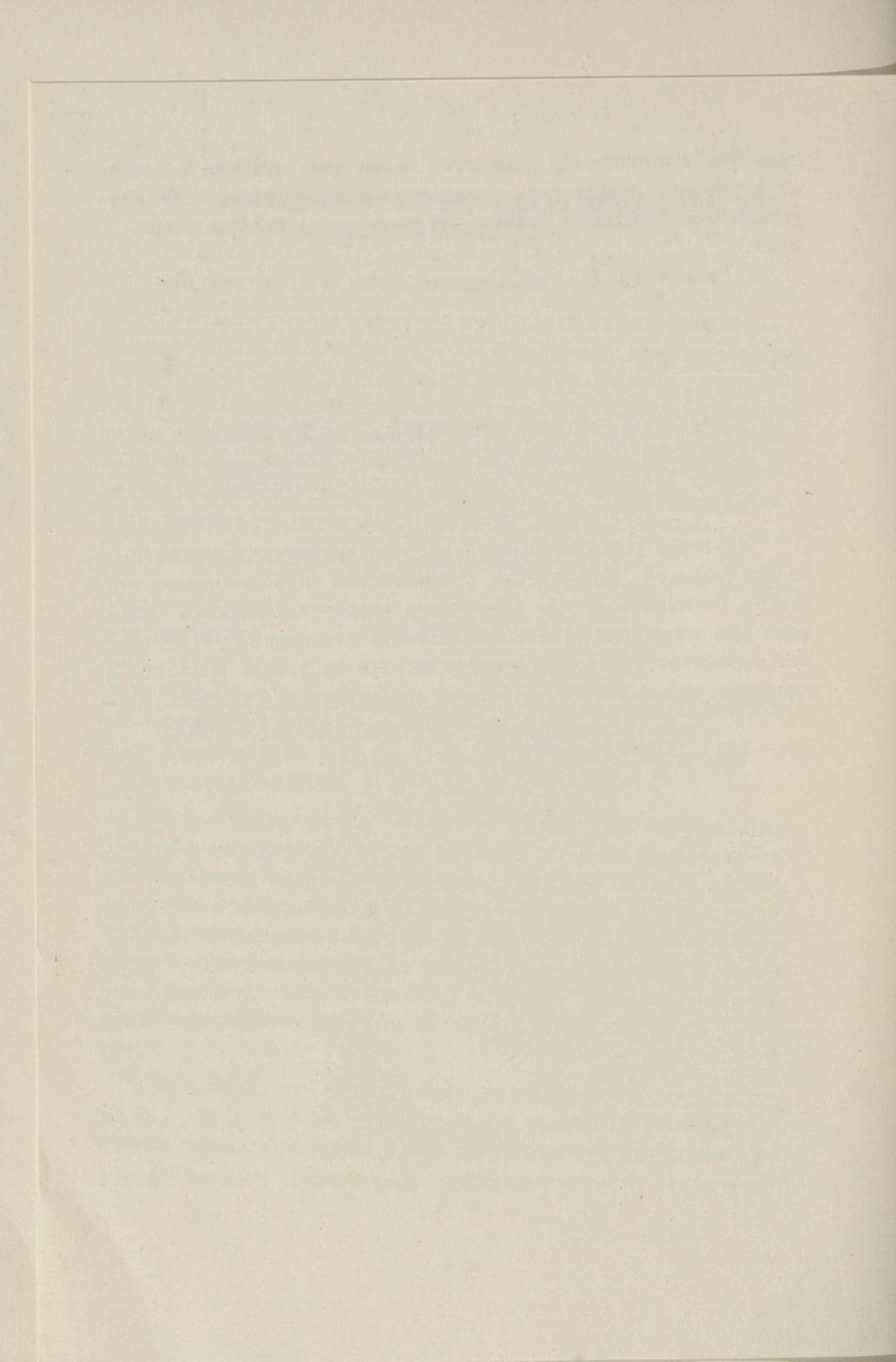
В статье рассматривается процесс возникновения и развития турбулентности при разном движении жидкости в гидравлической трубе. Экспериментальные результаты, полученные методом измерения скорости течения, позволяют выявить закономерности возникновения турбулентности для различных значений скорости течения. Приведены результаты измерения скорости течения в гидравлической трубе. Экспериментальные результаты, полученные методом измерения скорости течения, позволяют выявить закономерности возникновения турбулентности для различных значений скорости течения.

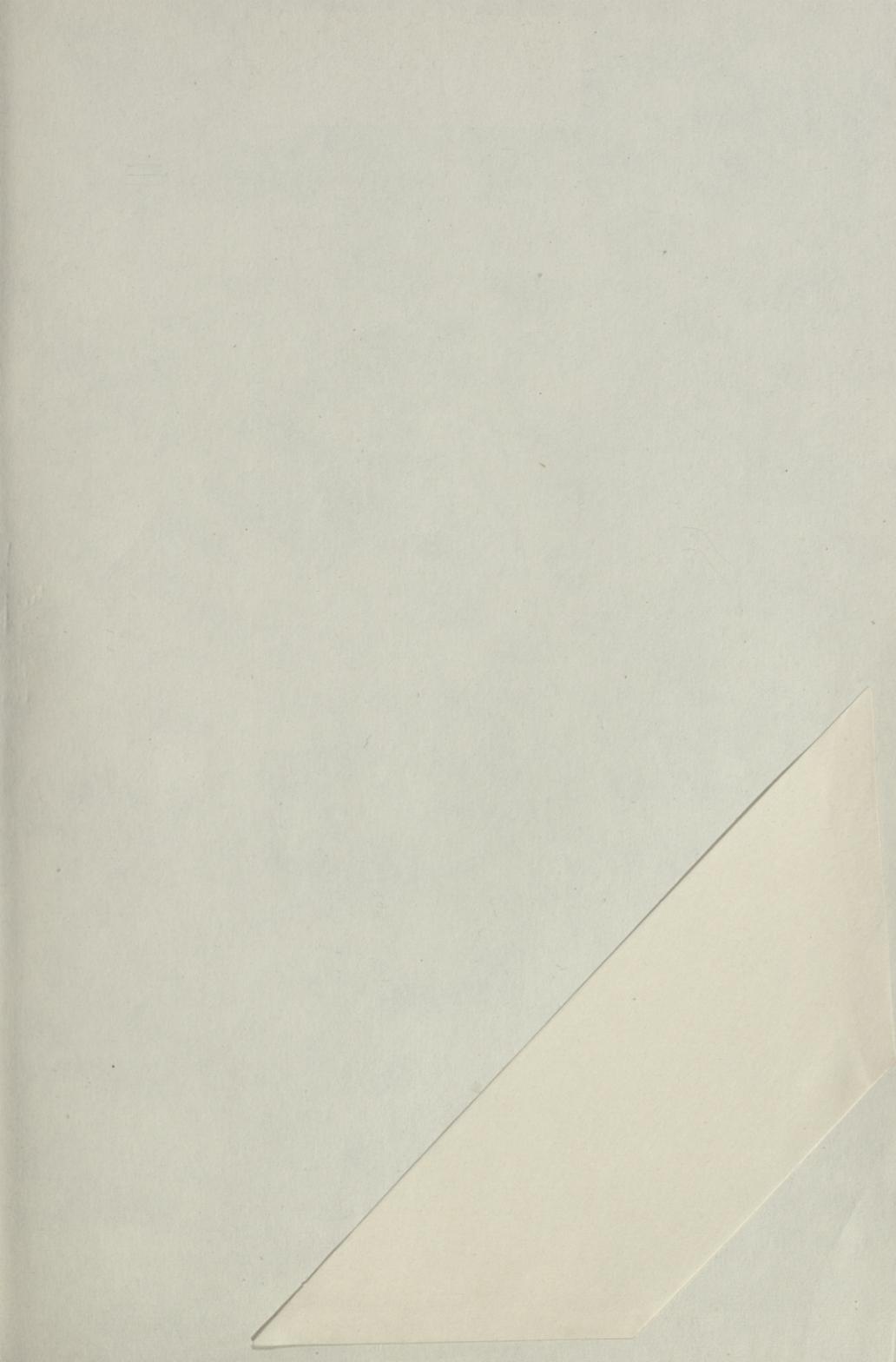
Думан Г. В. - Труды Ташкентского политехнического института, 1967, № 6, с. 47-57.

В работе проведены численные расчеты нестационарного движения несжимаемой вязкой жидкости в трубе кругового сечения. Анализ результатов показал, что при наличии осевых градиентов кинетической энергии турбулентности у стенки трубы в обдуваемой зоне наблюдается характерная схема течения, которая имеет место в области течения. В области течения наблюдается характерная схема течения, которая имеет место в области течения. В области течения наблюдается характерная схема течения, которая имеет место в области течения.

Показано, что обдуваемый метод имеет высокую сходимость, обусловленную применением граничных условий у стенки трубы. Приведен метод численного решения задачи, который значительно повышает скорость сходимости.







EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00082371 0

Цена 75 коп.