

Er. 6.7  
632

ISSN 0136-3549

0233-5697

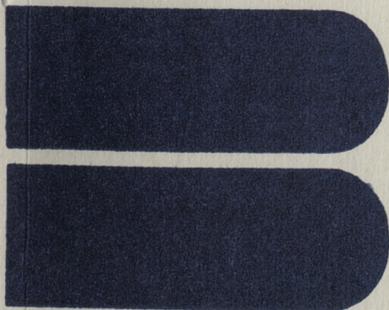
TALLINNA  
POLÜTEHNILISE INSTITUUDI  
TOIMETISED

632

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
ИНСТИТУТА

ТПИ  
'87

ГИДРОАЭРОДИНАМИКА  
И ДИНАМИКА  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ





УДК 62-82-53.001.573+681.586.35+

532.54.013.2+532.574

## ● ГИДРОАЭРОДИНАМИКА

И

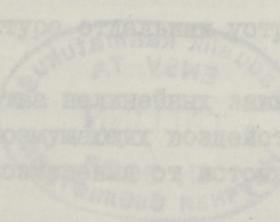
ДИНАМИКА

СИСТЕМ

УПРАВЛЕНИЯ

## Гидравлика и пневматика II

Таллин 1987



171  
187

TALLINNA POLITEHNILISE INSTITUDI TOimetised

TALLINNA POLITEHNILISE INSTITUDI TOimetised

УДК 62-82-82-58.001.573+681.586.88-88  
532.84.018.2+532.574

Гидроаэродинамика

N

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Труды ТПИ № 632

ГИДРОАЭРОДИНАМИКА И ДИНАМИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
Гидравлика и пневматика 11

На русском языке

Ответственный редактор В. Реэдик

Технический редактор Е. Зорина

Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 11.12.1986 г.

Подписано к печати 26.03.1987 г.

МВ- 04227

Формат 60x90/16

Печ. л. 8,75 + 0,5 приложение

Уч.-изд. л. 9,65

Тираж 300

Заказ № 179

Цена 1,50

Таллинский политехнический институт

200108, Таллин, ул. Эхитаяте tee, 5

Ротапринт ТПИ, 200008, Таллин, Коскла, 2/9

© Таллинский политехнический институт, 1987



1987 жылда

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЦЕПНЫХ СИСТЕМ

Важнейшим этапом расчета статических, стационарных и динамических характеристик гидромеханических цепных систем является построение их математических моделей. Несмотря на большое количество используемых методов построения математических моделей и применяемых методов их решения, не существует единого общепринятого подхода. Это объясняется тем, что применяемые к решению рассматриваемых задач методы классической механики [1, 2, 3, 4], теории автоматического управления [5, 6, 7, 8, 9, 22, 23], электро- и электронной техники [1, 10, 11, 12] и другие [24, 25] недостаточно учитывают специфику гидромеханических систем. Общим существенным недостатком всех этих методов является то, что в них недостаточное внимание уделяется установлению правильной причинно-следственной зависимости между переменными.

Важнейшими особенностями гидромеханических систем являются:

- переменность структуры (по принципиальной схеме, по выполнению переключений, по срабатыванию аппаратов);
- преимущественно последовательное и разветвленное расположение элементов, причем параллельных цепей и замкнутых контуров обычно мало;
- небольшое общее количество устройств и аппаратов (обычно не превышает 15-20);
- сложная внутренняя структура отдельных устройств и аппаратов;
- наличие большого количества нелинейных зависимостей;
- многообразие входных и возмущающих воздействий (сигналы управления и регулирования, возмущения от источника энергии, от внешних воздействий).

К математическим моделям гидромеханических цепных систем предъявляются следующие основные требования:

—правильные причинно-следственные зависимости между переменными, соответствующие действительному протеканию процессов;

—явный учет как прямых возмущений, так и обратных воздействий;

—адекватность функциональных зависимостей описываемым физическим процессам;

—получение модели статики из модели динамики путем приятия членов динамики равными нулю;

—наглядность построения модели, гарантирующая учет всех зависимостей, а также позволяющая правильно составить уравнения и наметить ход вычислений;

—легкость перестройки структуры (модифицируемость) модели.

Расчет характеристик сложных цепных систем без применения средств вычислительной техники не представляется возможным. Построение математической модели для конкретной задачи, программирование алгоритма решения и отладка программ являются трудоемкими процедурами. Поэтому создаются пакеты программ, позволяющие формализовать составление математической модели и автоматически синтезировать программы [1, 3, 12, 13, 14]. При этом в распоряжении имеются отладочные и сервисные средства, база данных, используется диалоговый способ общения с ЭВМ.

Математические модели гидромеханических цепных систем с точки зрения применения вычислительной техники должны:

—позволять строить вычислительные модели сложных систем путем объединения моделей составных частей (обладать композируемостью) и позволять выполнять расчеты по частям (обладать декомпозируемостью);

—иметь возможность формализации и автоматизации построения вычислительных моделей;

—позволять осуществлять расчеты для широкого класса нелинейных зависимостей;

—обеспечить быстроту выполнения расчетов.

Современному уровню выполнения расчетов цепных систем соответствует применение пакетов программ с развитой системной частью. Для расчета статических, частотных и переходных

характеристик гидромеханических и электрогидромеханических систем, в частном случае гидравлических и электрогидравлических приводов и следящих приводов, Таллинским политехническим институтом совместно с Институтом кибернетики АН ЭССР разработан пакет программ HYDRA [20, 26]. Пакет программ создан с использованием новых принципов построения математических моделей, на базе инструментальной системы программирования ПРИЗ ЕС [14].

Математические модели, используемые в пакете программ HYDRA, строятся на нижеследующих принципах.

Элементы представляются в виде многополюсных моделей [15-19, 27]. С помощью многополюсных моделей элементов устанавливаются зависимости между всеми переменными элемента в сечениях взаимодействия с другими элементами. В качестве переменных многополюсных моделей используются потенциальные (давление, усилие, крутящий момент, напряжение) и потоковые переменные (объемный расход, перемещение, угол поворота, ток) попарно. Зависимости между переменными многополюсных моделей элементов выражаются несколькими уравнениями.

Используются такие формы многополюсных моделей элементов, которые изображают реальную, действительно имеющую место причинно-следственную процессов; выбор формы многополюсных моделей элементов устанавливается составлением блок-схемы системы.

Используются только те формы представления многополюсников, которые учитывают передачу возмущений в противоположных направлениях (формы Z, Y, H, G). Формы многополюсников B и A, учитывающие передачу возмущений только в одном направлении, являются искусственными, не отражающими реальные процессы, так как обе переменные в сечении не могут быть независимыми.

Из четырехполюсных моделей элементов, учитывающих распространение возмущений в противоположных направлениях, в большинстве случаев действительную причинно-следственную отражают модели формы H и G. Отличительной особенностью четырехполюсных моделей элементов формы H и G является наличие сквозных прямых и обратных передач и, кроме того, передач между попарными переменными, которые в отношениях динамики имеют процедуру дифференцирования. Таким образом, поперечные

передачи четырехполосников формы Н и Г вносят коррективы в прямые и обратные потоки переменных. Отдельные поперечные передачи могут быть приняты равными нулю без распада модели. Так, модели статики и стационарного движения образуются из моделей динамики путем принятия коэффициентов только при производных равным нулю.

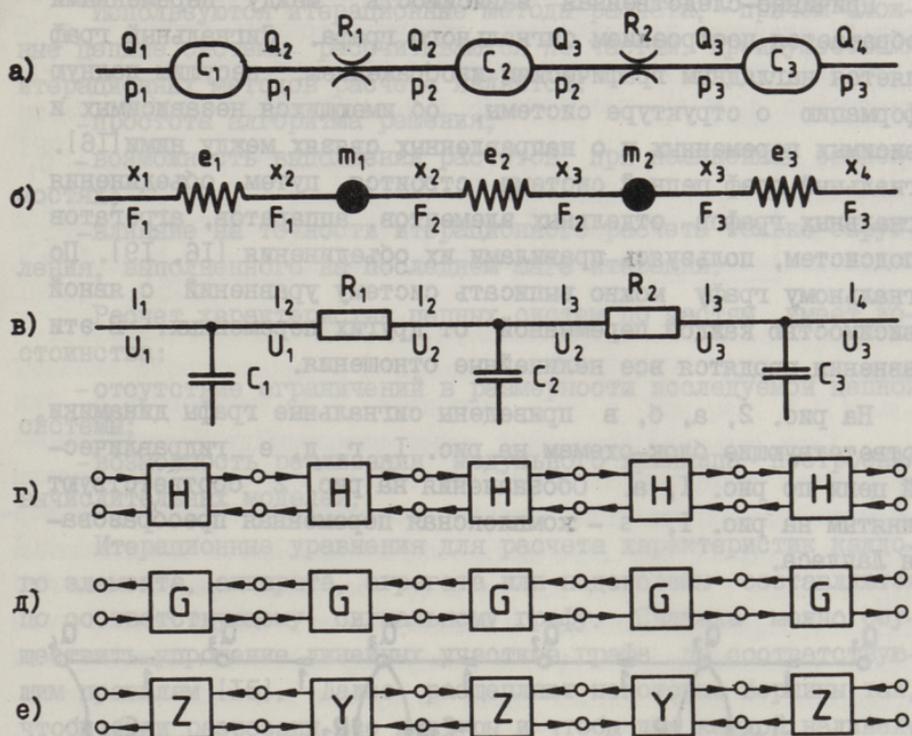
Дополнительно четырехполосникам формы Н и Г требуется включить в модель некоторые четырехполосники формы  $\Upsilon$  и  $Z$ , двухполосники и другие многополосники. Но и тогда должно быть соблюдено соответствие модели действительным причинно-следственным зависимостям между переменными.

Построенные таким образом модели не содержат чувствительных зависимостей, требующих при решении иметь очень малый шаг интегрирования или делающих невозможным использование итерационных методов расчета.

Общие правила составления и примеры блок-схем из многополосных моделей элементов приведены в [19]. Некоторые простые примеры гидравлической, механической и электрической цепей с вариантами их блок-схем из четырехполосных моделей элементов показаны на рис. 1.

Неблагоприятным является построение математических моделей цепных систем только на базе четырехполосников формы  $Z$  и  $\Upsilon$  в последовательных ветвях (рис. 1, е). Тогда в гидравлических цепях давление в каждом сечении определяется по четырехполосной модели формы  $Z$  как интеграл от разности объемных расходов, деленный на объемную упругость жидкости. Такие зависимости при малых объемных упругостях очень чувствительны к изменениям, поскольку разности объемных расходов до и после объемной упругости очень малы. При таком построении модели объемные упругости необходимо часто вводить искусственно.

Аналогично в механических цепях перемещение в каждом сечении определяется двукратным интегрированием разности сил, действующей на массу. При малых массах, что характерно механическим элементам гидроприводов, эти разности сил очень малы и, следовательно, процедура интегрирования очень чувствительна. Именно такой структуре соответствуют модели, построенные традиционным способом в виде системы дифференциальных уравнений в форме уравнений состояния (в форме Коши).



$Q$  - объемный расход;  $x$  - перемещение;  $I$  - ток;  
 $p$  - давление;  $F$  - сила;  $U$  - напряжение;  
 $C$  - объемная упругость;  $e$  - податливость;  $C$  - емкость;  
 $R$  - сопротивление;  $m$  - масса;  $R$  - сопротивление.

Рис. 1. Примеры гидравлической (а), механической (б), электрической (в) одномерной цепи и различные (г, д, е) блок-схемы из четырехпольных моделей элементов, которые можно составить для каждой из перечисленных цепей.

Такие уравнения не позволяют исключить члены динамики без распада модели.

Для различных входных воздействий требуется иметь различные по причинно-следственным зависимостям между переменными варианты моделей. Различные варианты моделей требуются также для описания структурной переменности гидроприводов. Структурно переменными являются все гидроприводы, о чем свидетельствует то, что колебания в гидроприводах в общем случае имеют несимметричный, негармонический характер.

Причинно-следственная зависимость между переменными изображается построением сигнального графа. Сигнальный граф является наглядным графическим изображением, несущим полную информацию о структуре системы, об имеющихся независимых и зависимых переменных и о направленных связях между ними [16]. Сигнальный граф цепной системы строится путем объединения сигнальных графов отдельных элементов, аппаратов, агрегатов и подсистем, пользуясь правилами их объединения [16, 19]. По сигнальному графу можно выписать систему уравнений с явной зависимостью каждой переменной от других переменных. В эти уравнения вводятся все нелинейные отношения.

На рис. 2, а, б, в приведены сигнальные графы динамики, соответствующие блок-схемам на рис. 1, г, д, е гидравлической цепи по рис. 1, а. Обозначения на рис. 2 соответствуют принятым на рис. 1,  $s$  - комплексная переменная преобразования Лапласа.

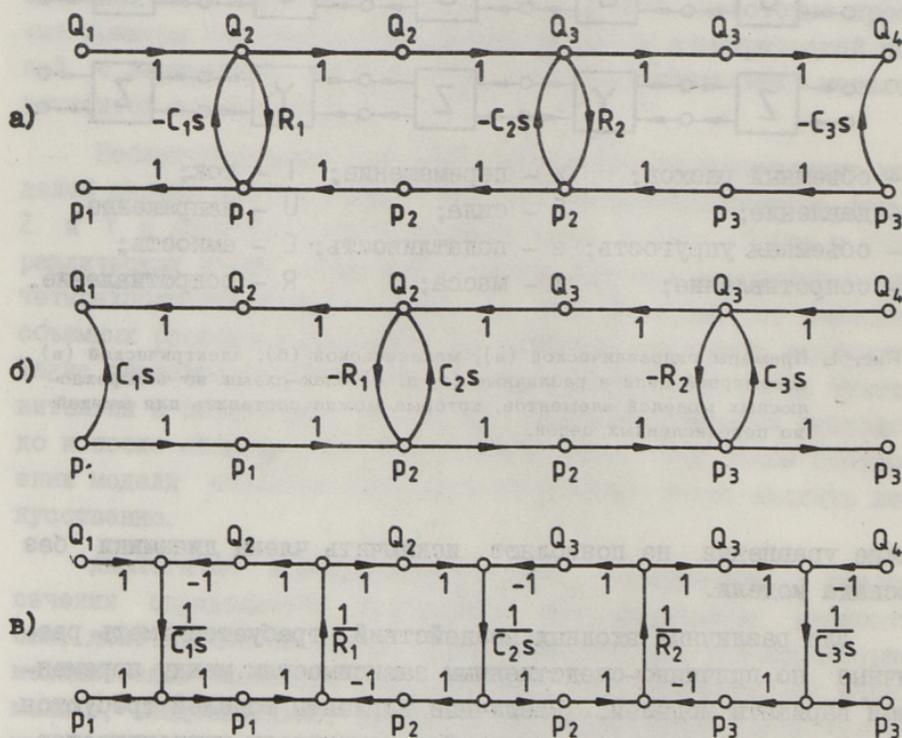


Рис. 2. Сигнальные графы динамики, соответствующие блок-схемам на рис. 1, г, д, е гидравлической цепи по рис. 1, а.

Используются итерационные методы расчета, причем сложные цепные системы рассчитываются по частям. Преимуществами итерационных методов расчета являются:

- простота алгоритма решения;
- возможность выполнения расчетов при нелинейных зависимостях;
- влияние на точность итерационного расчета только округления, выполненного на последнем шаге итерации.

Расчет характеристик цепных систем по частям имеет достоинства:

- отсутствие ограничений в размерности исследуемой цепной системы;
- возможность реализации модульного принципа построения вычислительных моделей.

Итерационные уравнения для расчета характеристик каждого элемента, аппарата, агрегата или подсистемы составляются по соответствующему сигнальному графу. Сначала можно осуществить упрощение линейных участков графа по соответствующим правилам [15]. Далее расщепляют некоторые вершины так, чтобы были разрезаны все контуры и чтобы для каждой нелинейной зависимости имелся отдельный независимый источник. Относительно стоков расщепленных вершин выписываются итерационные уравнения.

Используется двухуровневый метод итерации. На первом уровне рассчитываются характеристики отдельных устройств, на втором — для достижения общего решения всей системы согласуются междомодульные потенциальные переменные (давления, силы).

Пакет программ HYDRA [20, 26] позволяет рассчитать статические, стационарные, частотные и переходные характеристики. Частотные характеристики рассчитываются прямо, без вывода передаточных функций. Нелинейные зависимости подвергаются гармонической линеаризации, причем учитываются смещения средних значений колебаний. Расчет переходных характеристик осуществляется по итерационным алгебраическим (разностным) уравнениям [21].

Описанные принципы построения математических моделей и методы расчета характеристик успешно могут быть использованы при создании пакетов программ для расчета характеристик различных цепных систем.

В качестве моделей элементов пневматических и газовых цепей следует использовать восьмиполосники формы Н и Г (рис. 3), где переменными являются объемные расходы  $Q_1$  и  $Q_2$ , плотности  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , давления  $p_1$  и  $p_2$ , температуры  $T_1$  и  $T_2$ .

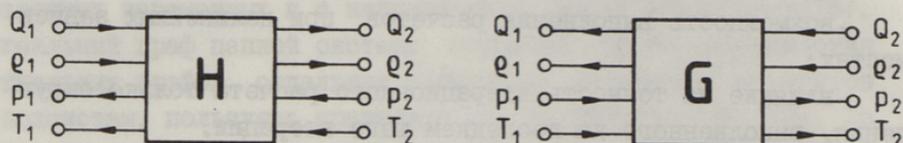


Рис. 3. Восьмиполосные модели формы Н и Г элементов одномерных пневматических цепей.

Блок-схемы механических цепей плоского движения, например, цепи корпусных деталей несущих систем станков, должны быть составлены из двенадцатиполосных моделей элементов формы Н и Г (рис. 4). В качестве переменных имеем координатные перемещения  $x$ ,  $y$ , углы поворота  $\varphi$ , соответствующие силы  $F_x$ ,  $F_y$  и крутящие моменты  $T$ . В таких моделях могут быть учтены любые нелинейные зависимости между переменными. Используемые в настоящее время модели цепей корпусных деталей, как правило, являются линейными.

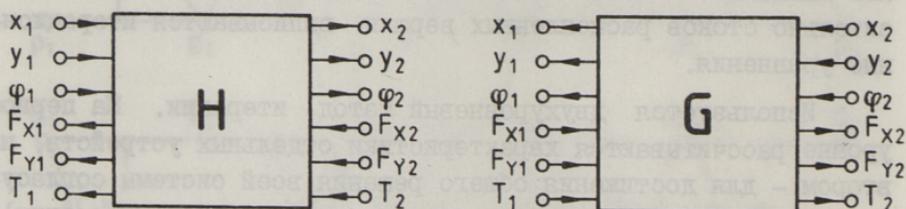


Рис. 4. Двенадцатиполосные модели формы Н и Г элементов двухмерных механических цепей.

Приведенные выше принципы могут быть успешно использованы также при анализе цепей теплопередачи.

Математические модели гидромеханических цепных систем, построенные по приведенным принципам, соответствуют всем предъявленным требованиям. Достижение оптимального построения моделей объясняется тем, что модели получаются естественными, что причинно-следственные зависимости между переменными принимаются в соответствии с действительно происходящими процессами.

## Л и т е р а т у р а

1. А рай с Е.А., Д м и т р и е в В.М. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1982. - 160 с.
2. П о п о в Д.Н. и др. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов /Д.Н.Попов, С.А.Ермаков, И.Н.Лобода и др.; Под ред. Д.Н.Попова. - М.: Машиностроение, 1978. - 142 с.
3. М а л и н о в с к и й Е.Ю. и др. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ /Е.Ю.Малиновский, Л.Б.Зарецкий, Ю.Г.Беренгард и др.; Под ред. Е.Ю.Малиновского. - М.: Машиностроение, 1980. - 216 с.
4. Б а ж е н о в А.И. и др. Проектирование следящих гидравлических приводов летательных аппаратов /А.И.Баженов, Н.С.Гамынин, В.И.Карев и др.; Под ред. Н.С.Гамынина. - М.: Машиностроение, 1981. - 312 с.
5. К о р о б о ч к и н Б.Л. Динамика гидравлических систем станков. - М.: Машиностроение, 1976. - 240 с.
6. К о н д а к о в Л.А. и др. Машиностроительный гидропривод /Л.А.Кондаков, Г.А.Никитин, В.Н.Прокофьев и др.; Под ред. В.Н.Прокофьева. - М.: Машиностроение, 1978. - 495 с.
7. Ч у п р а к о в Ю.П. Гидропривод и средства гидроавтоматики. - М.: Машиностроение, 1979. - 232 с.
8. С м и р н о в а В.И. и др. Основы проектирования и расчета следящих систем /В.И.Смирнова, Ю.А.Петров, В.И.Разинцев. - М.: Машиностроение, 1981. - 312 с.
9. М о л ь Р. Гидроавтоматика. Пер. с франц. - М.: Машиностроение, 1975. - 352 с.
10. Б е р д н и к о в В.В. Прикладная теория гидравлических цепей. - М.: Машиностроение, 1977. - 192 с.
11. Г л и к м а н Б.Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях. - М.: Машиностроение, 1979. - 256 с.
12. Ч к а л о в В.В. Схемное представление устройств гидроавтоматики для систем автоматизированного проектирования. - Гидропривод и гидропневмоавтоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб., вып. 20. - Киев: Техника, 1984. - С. 99-109.
13. Д о д о н о в С.Б. Принципы построения проблемно-ориентированных САПР в машиностроении // Кибернетика. - 1981. - № 1. - С. 55-59.

14. Кахро М.И., Калья А.П., Тыугу Э.Х. Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ). - М.: Финансы и статистика, 1981. - 158 с.
15. Гроссшмидт Г.Т. Расчет передаточных функций сигнальных графов четырехполосников звеньев гидромеханических цепей гидроприводов металлорежущих станков // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А.-1971.- № 317.- С. 131-145.
16. Гроссшмидт Г.Т. Статьи (6) в сб.: Гидравлика и пневматика металлорежущих станков // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1977. - № 435. - С. 3-63.
17. Гроссшмидт Г.Т., Пахапилль Я.А. Многополосные модели расчета характеристик регулятора потока гидроприводов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та.-1983.- № 553.- С. 75-90.
18. Гроссшмидт Г.Т., Пахапилль Я.А. Итерационный расчет статической характеристики гидравлического следящего привода // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1983. - № 553. - С. 91-104.
19. Ванавески Ю.Й. Составление блок-схем гидромеханических систем из многополосных моделей функциональных элементов (см. наст. сб., с. 15-27).
20. Пахапилль Я.А., Гроссшмидт Г.Т. Пакет программ для моделирования гидромеханических систем (см. наст. сб., с. 47-56).
21. Пайс Э.А., Ванавески Ю.Й. Построение математических моделей итерационного расчета переходных характеристик элементов гидромеханических систем (см. наст. сб., с. 29-36).
22. Schulz R. Berechnung des dynamischen Verhaltens hydraulischer Antriebe großer Leistung für Umformmaschinen. Dissertation. Techn. Hochschule Aachen. 1979, 132 S.
23. Backé W., Hoffmann W. DSH - program system for digital simulation of hydraulic systems. - 6th International Fluid Power Symposium, April 8-10, 1981.
24. Bowns D.E., Mech M.I., Rolfe A.C. Computer simulation as a first step towards computer aided design of fluid power systems. - 5th International Fluid Power Symposium, Sept. 13-15, 1978, vol.1, paper A3. Durham, England, p. 29-46.
25. Dransfield P. Hydraulic Control Systems - Design and Analysis of Their Dynamics. Lecture Notes in

Control and Information Sciences. Vol.33. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 1981, 227 p.

26. G r o ß s c h m i d t G., P a h a p i l l J. Programmpaket zur Modellierung der hydromechanischen Systeme. - 6. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge - Teil 3. Magdeburg, DDR, 1985, S. 609-617.

27. G r o ß s c h m i d t G., P a h a p i l l J. Modulaufbau der mathematischen Modelle zur Berechnung der Frequenzkennlinien des hydraulischen Servoantriebs. - 5. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge - Teil 1. Dresden, DDR, 1983, S. 72-81.

Важным этапом при построении математической модели гидромеханической системы является составление блок-схемы из многопольсных моделей функциональных элементов (ФЭ). Такими ФЭ могут быть функциональные элементарные и сложные звенья, гидронасосы и гидродвигатели, различные гидроаппараты, вспомогательные устройства и др.

В качестве исходных данных для составления блок-схемы необходимо иметь функциональную схему гидромеханической системы и требуемые входные и выходные переменные. При этом следует учитывать следующие требования:

### Aufbauprinzipien der mathematischen Modelle der hydromechanischen Systeme

#### Zusammenfassung

Es werden die aufgestellten Forderungen für mathematische Modelle der hydromechanischen Kettensysteme betrachtet. Man beschreibt die Aufbauprinzipien der mathematischen Modelle, die es ermöglichen, die wahren kausalen Beziehungen zwischen Variablen zu bekommen und die es erlauben, den Modulaufbau der Modelle und die Iterationsrechnungsmethoden zu benutzen. Die zusätzlichen Benutzungsgebiete der Modellaufbauprinzipien sind vorgewiesen.

Схема построения математической модели гидромеханической системы приведена в табл. 1 и 2. Обозначения ФЭ приняты состоящими из двух латинских букв, в соответствии с наименованием ФЭ на английском языке. В таблицах для каждого ФЭ приведены обозначения всех форм двух-, четырех- и шестипольсных моделей, которые могут быть использованы для получения правильных причинно-следственных зависимостей между переменными [1]. Входные и выходные переменные форм двух- и четырехпольсных моделей ФЭ показаны на рис. 1. Для форм шестипольсных моделей ФЭ показаны на рис. 2.



СОСТАВЛЕНИЕ БЛОК-СХЕМ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
ИЗ МНОГОПОЛЮСНЫХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Важным этапом при построении математической модели гидромеханической системы является составление блок-схемы из многополюсных моделей функциональных элементов (ФЭ). Такими ФЭ могут быть функциональные элементарные и сложенные звенья, гидронасосы и гидродвигатели, различные гидроаппараты, вспомогательные устройства и др.

В качестве исходных данных для составления блок-схемы необходимо иметь функциональную схему гидромеханической системы и требуемые входные и выходные переменные. При этом следует иметь вспомогательные материалы:

- варианты форм представления многополюсных моделей различных ФЭ и рекомендации по их применению;
- правила соединения многополюсных моделей ФЭ, типичные варианты их соединения и блок-схемы типичных гидромеханических систем.

Сначала по функциональной схеме устанавливают все сосредоточенные ФЭ. Для выбора подходящих форм многополюсных моделей необходимо иметь номенклатуру допустимых к использованию форм.

Номенклатура основных функциональных элементарных и сложенных звеньев, а также различных устройств гидромеханических систем приведена в табл. 1 и 2. Обозначения ФЭ приняты состоящими из двух латинских букв, в соответствии с наименованием ФЭ на английском языке. В таблицах для каждого ФЭ приведены обозначения всех форм двух-, четырех- и шестиполюсных моделей, которые могут быть использованы для получения правильных причинно-следственных зависимостей между переменными [1]. Входные и выходные переменные форм двух- и четырехполюсных моделей ФЭ показаны на рис. 1. Для форм шес-

Обозначения и используемые формы многополюсных моделей  
основных функциональных элементарных звеньев  
гидромеханических систем

Функциональный элемент		Обозначение	Обозначения используемых форм	
Наименование			двухполюсных моделей	четырёхполюсных моделей
на русском языке	на английском языке			
Гидравлическое сопротивление	Hydraulic resistor	RR	$Y'_{RR}, Z'_{RR}$	$H_{RR}, G_{RR}, Y_{RR}$
Гидравлические утечки, перетечки	Hyd. leakage, internal leakage	LE	$Y'_{LE}$	$H_{LE}, G_{LE}, Y_{LE}$
Гидравлическая емкость	Hydraulic capacitor	CA	$Y'_{CA}, Z'_{CA}$	$H_{CA}, G_{CA}, Z_{CA}$
Механическая упругость	Mechanical elastance	EL	$Z'_{EL}, Y'_{EL}$	$H_{EL}, G_{EL}, Z_{EL}$
Мех. инерционность с демпфером	Mech. inertia with damper	ID	$Z'_{ID}$	$H_{ID}, G_{ID}$

типолюсных моделей гидронасоса, гидромотора и поршня со штоком входные и выходные переменные показаны на рис. 2, соответственно а, б, в.

Во всех случаях многополюсные модели выражают зависимости между потенциальными (давление, сила, крутящий момент, напряжение) и потоковыми переменными (объемный расход, перемещение, скорость, частота вращения, ток). Положительные направления принимаются слева направо по принятому направлению цепи для всех переменных, кроме потенциальных переменных правого конца четырехполюсных моделей механических ФЭ, для которых положительное направление справа налево [2, 3].

Каждый ФЭ может иметь различные по построению и по учитываемым факторам математические модели. Многополюсные модели первоначально строятся как линейные модели динамики в изображениях Лапласа, где переменными являются отклонения от стационарного режима. Преобразование этих первоначальных линейных моделей в нелинейные модели для расчета стационарных, частотных и переходных характеристик рассматривается в [4, 5].

Соединение многополюсных моделей осуществляется по принципам соединения сигнальных графов. Две вершины несвязанных сигнальных графов можно объединить, если этим верши-

Обозначения и используемые формы многополюсных моделей  
основных функциональных сложенных звеньев и устройств гидромеханических систем

Функциональный элемент		Функциональный элемент	Обозначения используемых форм		
на русском языке	на английском языке		двух-полюсных моделей	четырех-полюсных моделей	шести-полюсных моделей
Золотник	Spool	SP	Y <sub>SP</sub>	Y <sub>SP</sub>	Y <sub>SP</sub>
Золотник клапана с каналом корпуса	Valve spool with ducts in body	SV	Y <sub>SV</sub>	Y <sub>SV</sub>	Y <sub>SV</sub>
Золотниковое сопротивление	Spool resistor	RS	Y <sub>RS</sub> , Z <sub>RS</sub>	H <sub>RS</sub> , G <sub>RS</sub> , Y <sub>RS</sub>	-
Поршень, поршень со штоком	Piston, piston with rod	PI	Z <sub>PI</sub> , Y <sub>PI</sub>	H <sub>PI</sub> , G <sub>PI</sub> , Y <sub>PI</sub>	HH <sub>PI</sub> , GY <sub>PI</sub> , YG <sub>PI</sub>
Электродвигатель	Electromotor	ME	Y <sub>ME</sub> , Z <sub>ME</sub>	-	-
Гидронасос	Hydraulic pump	PH	Y <sub>PH</sub> , Z <sub>PH</sub>	H <sub>PH</sub> , G <sub>PH</sub>	H <sub>PH</sub> , G <sub>PH</sub> , Y <sub>PH</sub>
Гидроцилиндр	Hydraulic cylinder	CY	-	H <sub>CY</sub> , G <sub>CY</sub> , Y <sub>CY</sub>	HH <sub>CY</sub> , GY <sub>CY</sub> , YG <sub>CY</sub>
Гидромотор	Hydraulic motor	MH	-	-	HH <sub>MH</sub> , GY <sub>MH</sub> , YG <sub>MH</sub>
Клапан давления	Pressure control valve	VP	-	Y <sub>VP</sub> , H <sub>VP</sub>	-
Регуляционный клапан	Pressure-reducing valve	VR	-	G <sub>VR</sub>	-
Регулятор потока	Flow control valve	FC	-	Y <sub>FC</sub>	HH <sub>FC</sub>
Труба, канал	Tube, channel	TU	-	H <sub>TU</sub> , G <sub>TU</sub>	-
Аккумулятор	Accumulator	AC	Y <sub>AC</sub> , Z <sub>AC</sub>	-	-
Фильтр	Filter	FI	-	H <sub>FI</sub> , G <sub>FI</sub>	-

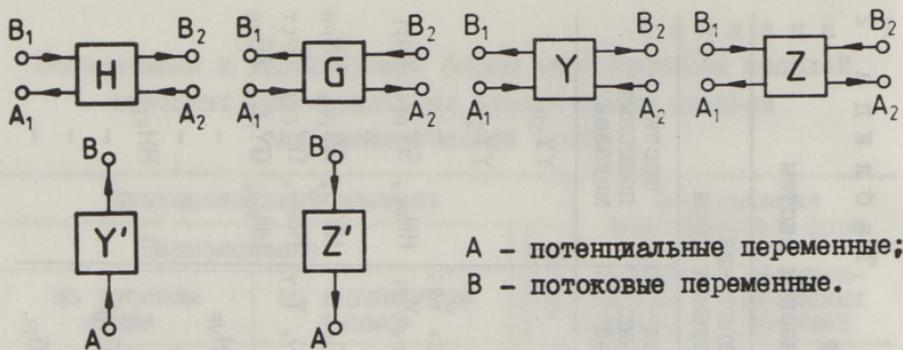
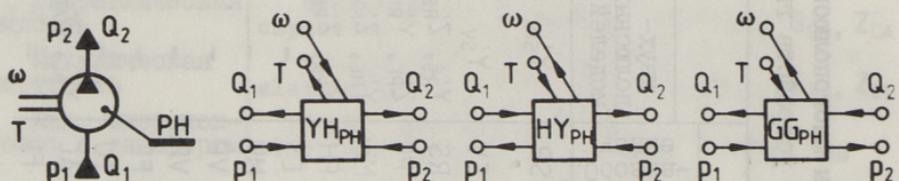
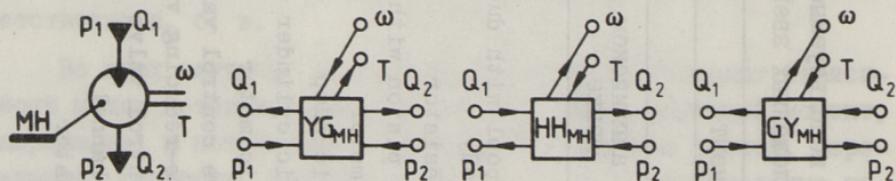


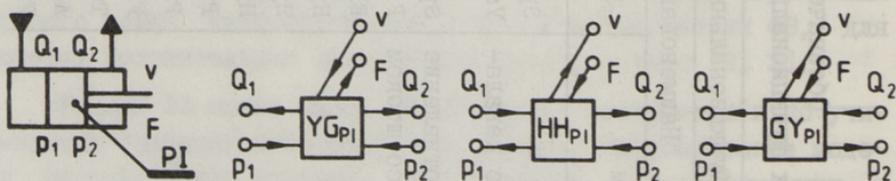
Рис. 1. Входные и выходные переменные двух- и четырехполюсных моделей ФЭ.



а)



б)



в)

$Q$  – объемный расход;     $\omega$  – угловая скорость;     $v$  – скорость;  
 $p$  – давление;             $T$  – крутящий момент;     $F$  – сила.

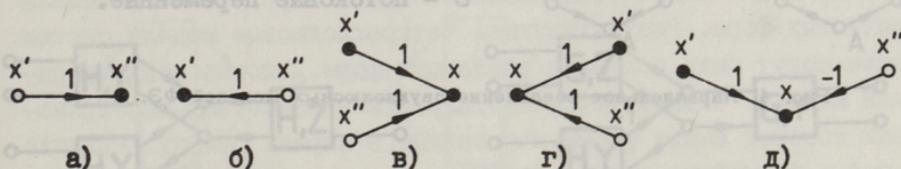
Рис. 2. Функциональные схемы гидронасоса, гидромотора, поршня со штоком и входные и выходные переменные используемых форм их шестиполюсных моделей.

нам соответствует одна и та же физическая переменная и, по крайней мере, одна из двух объединяемых вершин является источником в своем графе.

Способ объединения двух вершин зависит от соотношений между переменными  $x'$  и  $x''$ , соответствующими этим вершинам. Для рассматриваемых цепей возможны следующие условия:

равенства	$x' = x''$ ;
равенства суммы нулю	$x' + x'' = 0$ ;
суммирования	$x' + x'' = x$ ;
вычитания	$x' - x'' = x$ .

Условие равенства переменных можно реализовать введением показанного на рис. 3, а или б графа с единичной передачей. Далее вершина, которая не является источником, легко исключается путем перенесения входящих в нее дуг к вершине, которая до объединения была источником.



**Вершины графа:**  $\circ$  - источник или сток;  
 $\bullet$  - обязательно источник.

Рис. 3. Графы, вводимые при объединении двух вершин несвязанных сигнальных графов.

Вершины, соответствующие механической силе или крутящему моменту, объединяются по условию равенства суммы переменных нулю. Поскольку принятые положительные направления для  $x'$  и  $x''$  противоположны, то это условие преобразуется в условие равенства переменных.

В случае условия суммирования переменных будет введен граф, показанный на рис. 3, в или г. В случае условия вычитания переменных поступают аналогичным образом, с дополнительным введением передачи  $-1$  (рис. 3, д).

При одновременном объединении нескольких вершин двух сигнальных графов (например, соединение четырехполюсников между собой) указанные условия должны быть соблюдены для каждой пары объединяемых вершин. Условия суммирования и вы-

читания переменных распространяются также на одновременное объединение более чем двух вершин.

Гидравлические двухполюсники можно соединить только при общем независимом давлении и суммировании объемных расходов, т. е. соединяются параллельные двухполюсные модели формы  $Y'$  (рис. 4). Механические двухполюсники поступательного движения можно соединить только при общем перемещении (или общей скорости) и суммировании сил, т. е. соединяются параллельные двухполюсные модели формы  $Z'$ .

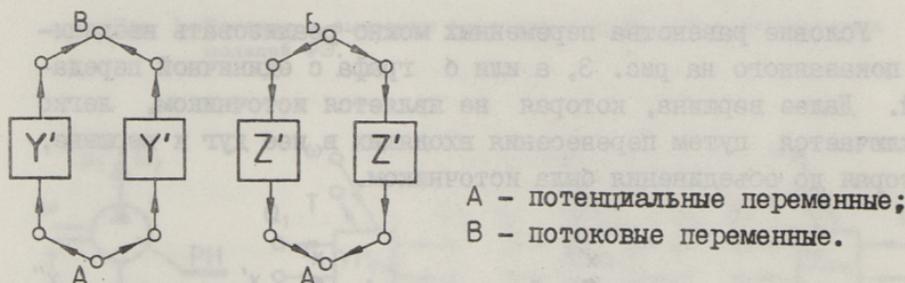


Рис. 4. Параллельное соединение двухполюсных моделей ФЭ.

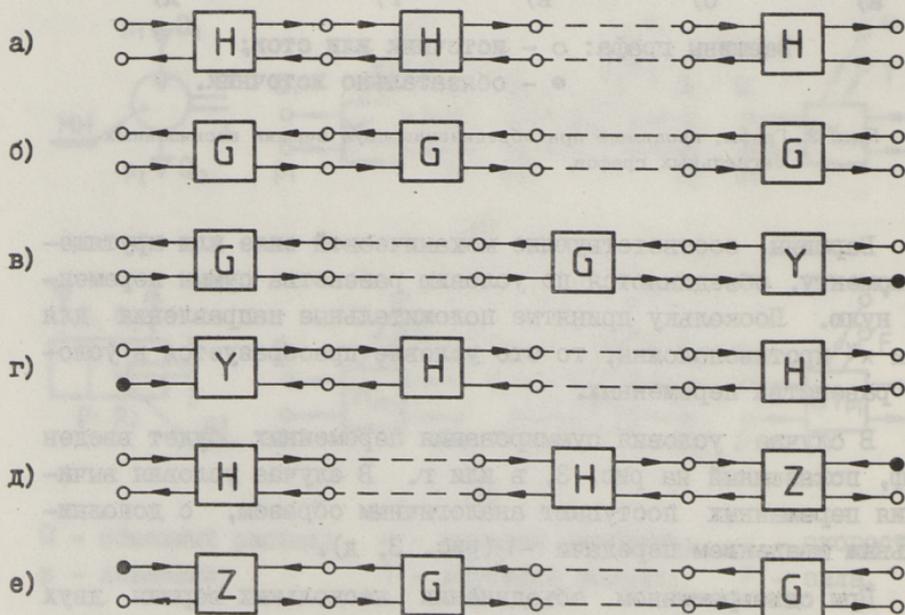


Рис. 5. Последовательное соединение четырехполюсных моделей ФЭ.

В моделях цепных систем с последовательным расположением ФЭ используются преимущественно четырехполюсные модели формы Н и Г (рис. 5, а, б). Для получения результирующего гидравлического четырехполюсника формы У или механического четырехполюсника формы Z в конец модели цепной системы подключается четырехполюсная модель ФЭ соответствующей формы (рис. 5, в, г, д, е). При этом входы, изображенные черной точкой, не используются, поскольку не обеспечивается прямое распространение возмущения.

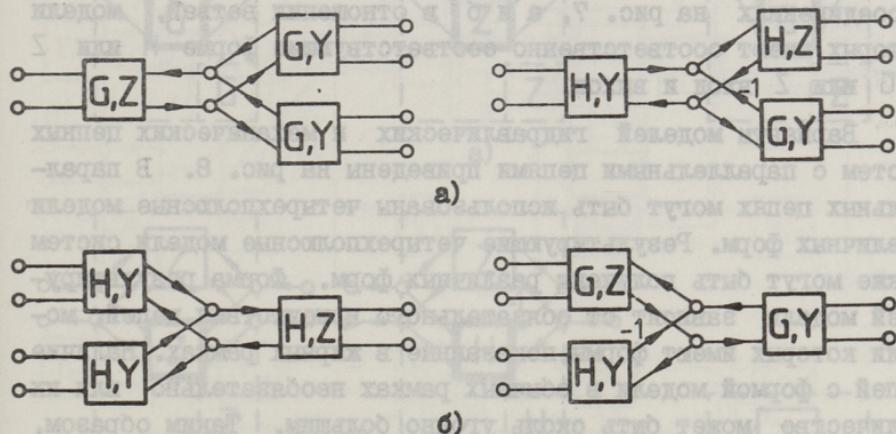


Рис. 6. Варианты разветвления (а) и соединения (б) моделей гидравлических цепей.

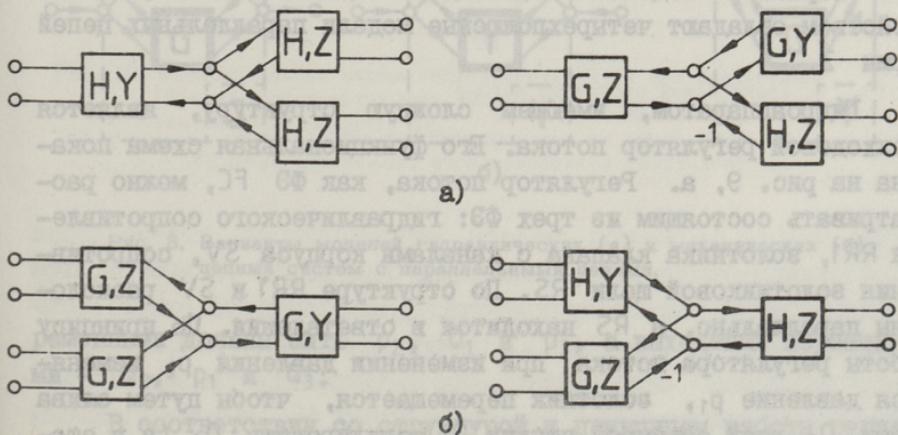


Рис. 7. Варианты разветвления (а) и соединения (б) моделей механических цепей.

При разветвлении или соединении моделей цепных систем из четырехполюсных моделей должны быть соблюдены условия равенства и суммирования (или вычитания) переменных. Варианты разветвления и соединения моделей гидравлических цепей рассматриваются на рис. 6, моделей механических цепей на рис. 7. При разветвлениях на рис. 6, а возможно неограниченное число ветвей, модели которых имеют соответствующие формы  $\Gamma$  или  $\Upsilon$  левый вход и выход. При соединениях на рис. 6, б возможно неограниченное число ветвей, модели которых имеют соответствующие формы  $\Pi$  или  $\Upsilon$  правый вход и выход. Для моделей механических цепей вышесказанное справедливо при разветвлениях и соединениях на рис. 7, а и б в отношении ветвей, модели которых имеют соответственно соответствующие формы  $\Pi$  или  $Z$  и  $\Gamma$  или  $Z$  вход и выход.

Варианты моделей гидравлических и механических цепных систем с параллельными цепями приведены на рис. 8. В параллельных цепях могут быть использованы четырехполюсные модели различных форм. Результирующие четырехполюсные модели систем также могут быть получены различных форм. Форма результирующей модели зависит от обязательного присутствия цепей, модели которых имеют формы, показанные в жирных рамках. Наличие цепей с формой модели в обычных рамках необязательно или их количество может быть сколь угодно большим. Таким образом, из любого варианта модели гидравлической цепной системы могут быть исключены или дополнительно введены параллельные цепи, четырехполюсные модели которых имеют форму  $\Upsilon$ . Для любого варианта модели механической цепной системы таким свойством обладают четырехполюсные модели параллельных цепей формы  $Z$ .

Гидроаппаратом, имеющим сложную структуру, является трехходовой регулятор потока. Его функциональная схема показана на рис. 9, а. Регулятор потока, как ФЭ  $FC$ , можно рассматривать состоящим из трех ФЭ: гидравлического сопротивления  $RR1$ , золотника клапана с каналами корпуса  $SV$ , сопротивления золотниковой щели  $RS$ . По структуре  $RR1$  и  $SV$  расположены параллельно, а  $RS$  находится в ответвлении. По принципу работы регулятора потока при изменении давления  $p_2$  изменяется давление  $p_1$ , золотник перемещается, чтобы путем слива части  $Q_3$  всей объемной подачи  $Q_1$  регулировать  $Q_2$  (а в статике обеспечить ее постоянство). Следовательно, входными пе-

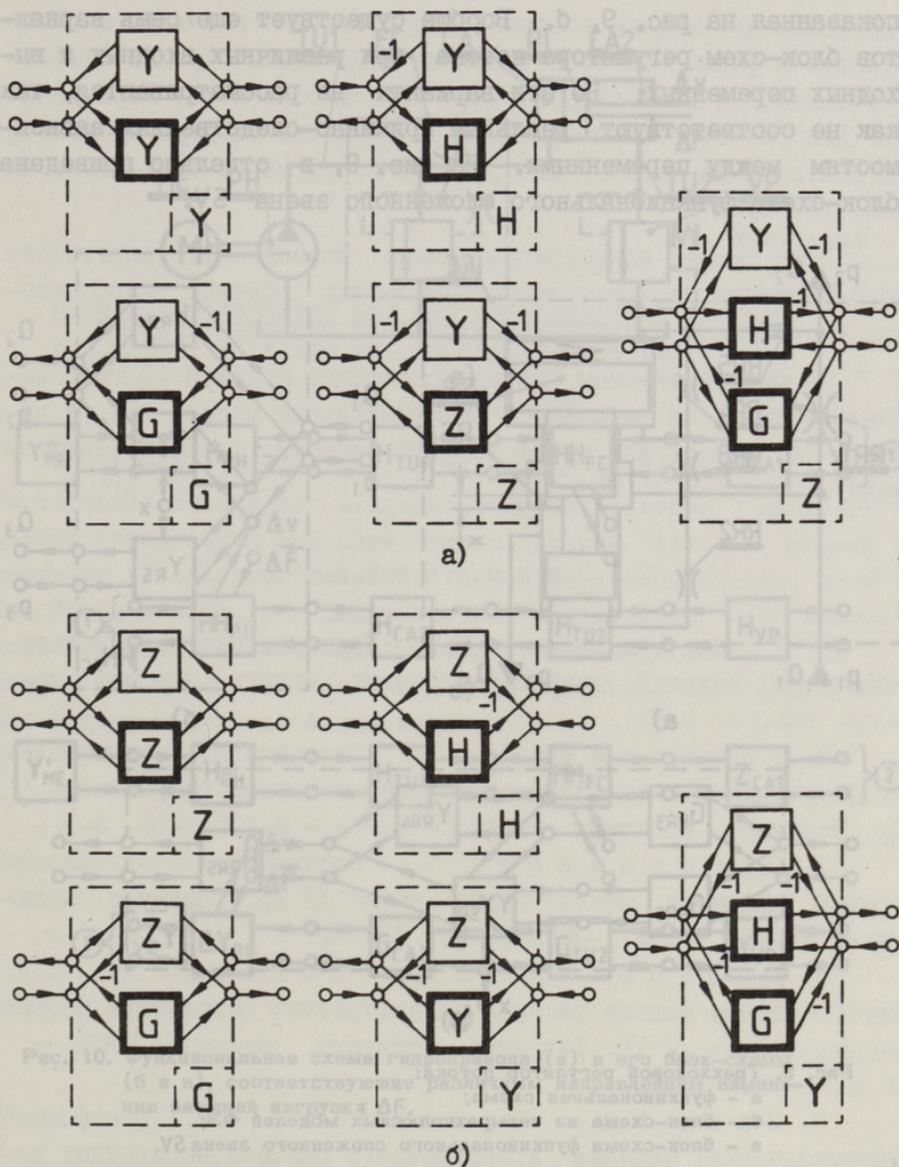


Рис. 8. Варианты моделей гидравлических (а) и механических (б) цепных систем с параллельными цепями.

ременными должны быть  $p_2$ ,  $Q_1$  и  $p_3$ , а выходными переменными —  $Q_2$ ,  $p_1$  и  $Q_3$ .

В соответствии со структурой и принципом работы регулятора потока, а также требуемыми входными и выходными переменными составлена блок-схема из четырехполюсных моделей ФЭ,

показанная на рис. 9, б. Вообще существует еще семь вариантов блок-схем регулятора потока при различных входных и выходных переменных. Но эти варианты не рассматриваются, так как не соответствуют реальным причинно-следственным зависимостям между переменными. На рис. 9, в отдельно приведена блок-схема функционального сложного звена SV.

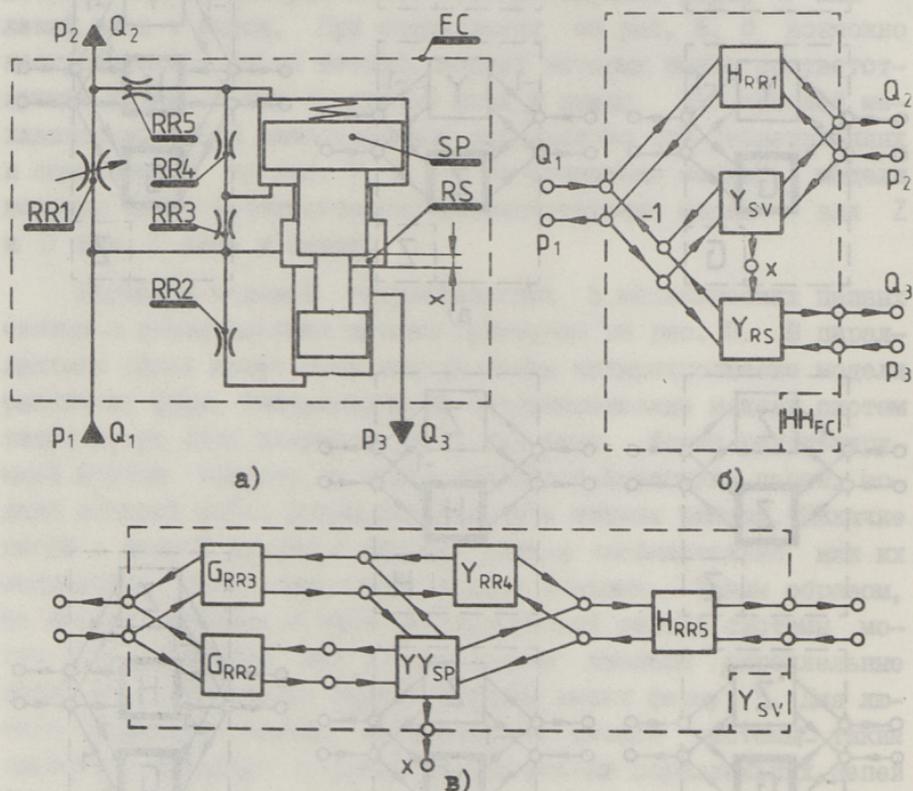


Рис. 9. Трехходовой регулятор потока:

а - функциональная схема;

б - блок-схема из четырехполюсных моделей ФЭ;

в - блок-схема функционального сложного звена SV.

Рассмотрим теперь составление блок-схемы из многополюсных моделей ФЭ для гидропривода, функциональная схема которого показана на рис. 10, а. Можно составить две принципиально различные блок-схемы, соответствующие различным направлениям изменения внешней нагрузки  $\Delta F$  на шток поршня, определяющим направление распространения изменения давления через ФЭ гидропривода. При направлении  $\Delta F$  налево необходимо

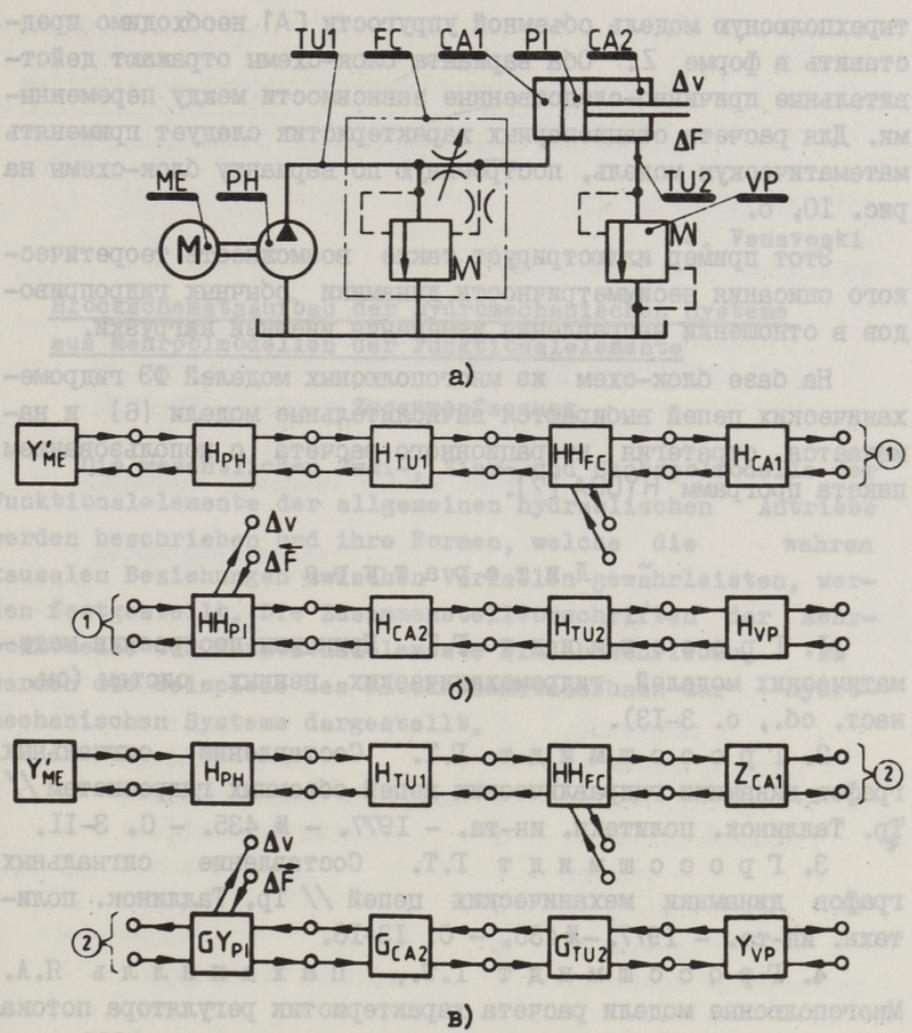


Рис. 10. Функциональная схема гидропривода (а) и его блок-схемы (б и в), соответствующие различным направлениям изменения внешней нагрузки  $\Delta F$ .

использовать шестиполосную модель поршня со штоком формы  $HH_{PI}$  (рис. 10, б), а при направлении  $\Delta F$  направо модель формы  $GY_{PI}$  (рис. 10, в). Для получения прямого и обратного сквозного распространения возмущения в системе в первом случае используем четырехполосные модели ФЭ формы  $H$ , а во втором — модели ФЭ формы  $G$ . Так как модель регулятора потока представляется в обоих случаях в форме  $HH_{FC}$ , то для обеспечения требуемых входных и выходных переменных во втором случае че-

трехпольсную модель объемной упругости CA1 необходимо представить в форме Z. Оба варианта блок-схемы отражают действительные причинно-следственные зависимости между переменными. Для расчета стационарных характеристик следует применять математическую модель, построенную по варианту блок-схемы на рис. 10, б.

Этот пример иллюстрирует также возможность теоретического описания несимметричности динамики обычных гидроприводов в отношении направления изменения внешней нагрузки.

На базе блок-схем из многопольсных моделей ФЭ гидромеханических цепей выбираются вычислительные модели [6] и намечается стратегия итерационного расчета с использованием пакета программ HYDRA [7].

### Л и т е р а т у р а

1. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Принципы построения математических моделей гидромеханических цепных систем (см. наст. сб., с. 3-13).

2. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Составление сигнальных графов динамики гидравлических цепей объемных гидросистем // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1977. - № 435. - С. 3-11.

3. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Составление сигнальных графов динамики механических цепей // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1977. - № 435. - С. 13-18.

4. Г р о с с ш м и д т Г.Т., П а х а п и л л ь Я.А. Многопольсные модели расчета характеристик регулятора потока гидроприводов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1983. - № 553. - С. 75-90.

5. П а й с Э.А., В а н а в е с к и Ю.Й. Построение математических моделей итерационного расчета переходных характеристик элементов гидромеханических систем (см. наст. сб., с. 29-36).

6. П а х а п и л л ь Я.А. Построение вычислительных моделей функциональных элементов гидромеханических систем (см. наст. сб., с. 37-45).

7. П а х а п и л л ь Я.А., Г р о с с ш м и д т Г.Т. Пакет программ для моделирования гидромеханических систем (см. наст. сб., с. 47-56).

Blockschemataaufbau der hydromechanischen Systeme aus Mehrpolmodellen der Funktionalelemente

Гидромеханический Zusammenfassung

Die wesentlichen Zwei-, Vier- und Sechspolmodelle der Funktionalelemente der allgemeinen hydraulischen Antriebe werden beschrieben und ihre Formen, welche die wahren kausalen Beziehungen zwischen Variablen gewährleisten, werden festgestellt. Die Zusammenstellvorschriften der Mehrpolmodelle der Funktionalelemente sind beschrieben. Es werden die Beispiele des Blockschemataaufbaus der hydro-mechanischen Systeme dargestellt.

- |                                 |                           |
|---------------------------------|---------------------------|
| G - проводимость;               | p - давление;             |
| g - ускорение силы тяжести;     | Q - объемный расход;      |
| h - коэффициент вязкого трения; | R - сопротивление;        |
| i - индекс;                     | σ - параметр Лапласа;     |
| j - индекс;                     | t - время;                |
| K - коэффициент линейности;     | V - скорость;             |
| k - константа;                  | W - функция;              |
|                                 | x - линейное перемещение. |

Греческий алфавит

- α - плоский угол;
- β - расстояние между поверхностями (щель);
- μ - коэффициент расхода;
- ν - кинематическая вязкость;
- ρ - плотность;
- τ - интервал времени.

Расчет переходных характеристик гидромоторов и гидроприводов методом интегрирования системы дифференциальных уравнений, представленных в форме Коши (уравнения состоя-



ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИТЕРАЦИОННОГО  
РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ  
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Перечень условных обозначений

Латинский алфавит

A	- площадь;	l	- длина;
c	- жесткость;	m	- масса;
d	- диаметр;	n	- индекс;
F	- сила, вес;	p	- давление;
G	- проводимость;	Q	- объемный расход;
g	- ускорение силы тяжести;	R	- сопротивление;
h	- коэффициент вязкого трения;	$\sigma$	- параметр Лапласа;
i	- индекс;	t	- время;
j	- индекс;	v	- скорость;
K	- коэффициент линеаризации;	W	- функция;
k	- константа;	x	- линейное перемещение.

Греческий алфавит

$\alpha$	- плоский угол;
$\delta$	- расстояние между поверхностями (щель);
$\mu$	- коэффициент расхода;
$\nu$	- кинематическая вязкость;
$\rho$	- плотность;
$\tau$	- интервал времени.

Расчет переходных характеристик гидроаппаратов и гидроприводов методом интегрирования системы дифференциальных уравнений, представленных в форме Коши (уравнений состоя-

ния), имеет ряд недостатков: значительность затрат машинного времени, невозможность расчета сложных нелинейных систем по частям, невозможность одновременного получения статических и переходных характеристик решением одной системы уравнений. Предлагаемая методика построения математических моделей на базе представления системы в виде связанных между собой многополюсных моделей элементов позволяет в значительной степени устранить эти недостатки.

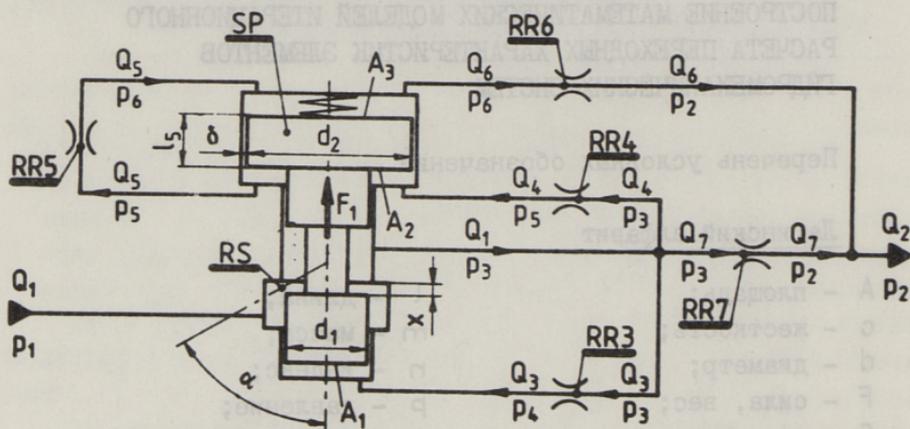


Рис. 1. Функциональная схема регулятора потока.

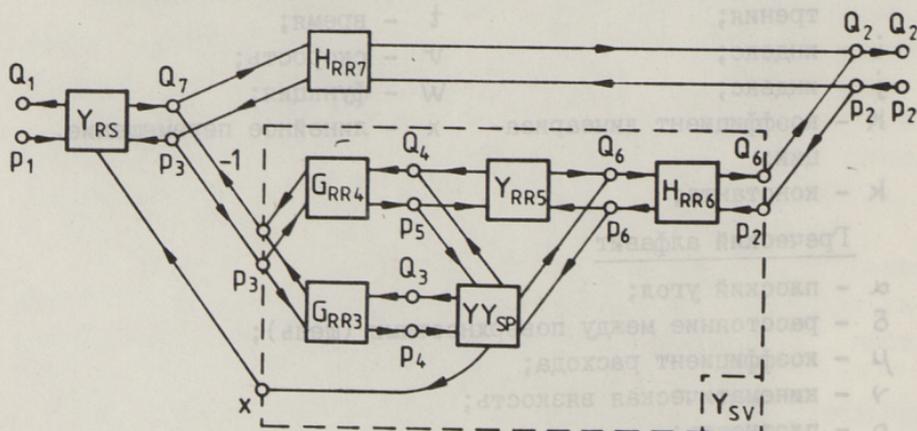


Рис. 2. Блок-схема из четырехполюсных моделей функциональных элементов регулятора потока.

Методика рассматривается на примере построения математической модели регулятора потока гидроприводов. На основе функциональной схемы регулятора потока, где указаны его

функциональные элементы и обозначены все переменные попарно (рис. 1), составляется блок-схема из многополюсных моделей этих элементов с изображением всех направленных связей между элементами (рис. 2) [1]. Блок-схема составляется по принципу получения истинных причинно-следственных зависимостей между переменными [2]. Многополюсная модель рассматриваемого регулятора потока имеет форму  $Y$ . По развернутому сигнальному графу динамики (рис. 3), соответствующему блок-схеме, можно проследить передачу возмущений между переменными. По сигнальному графу легко выписываются итерационные

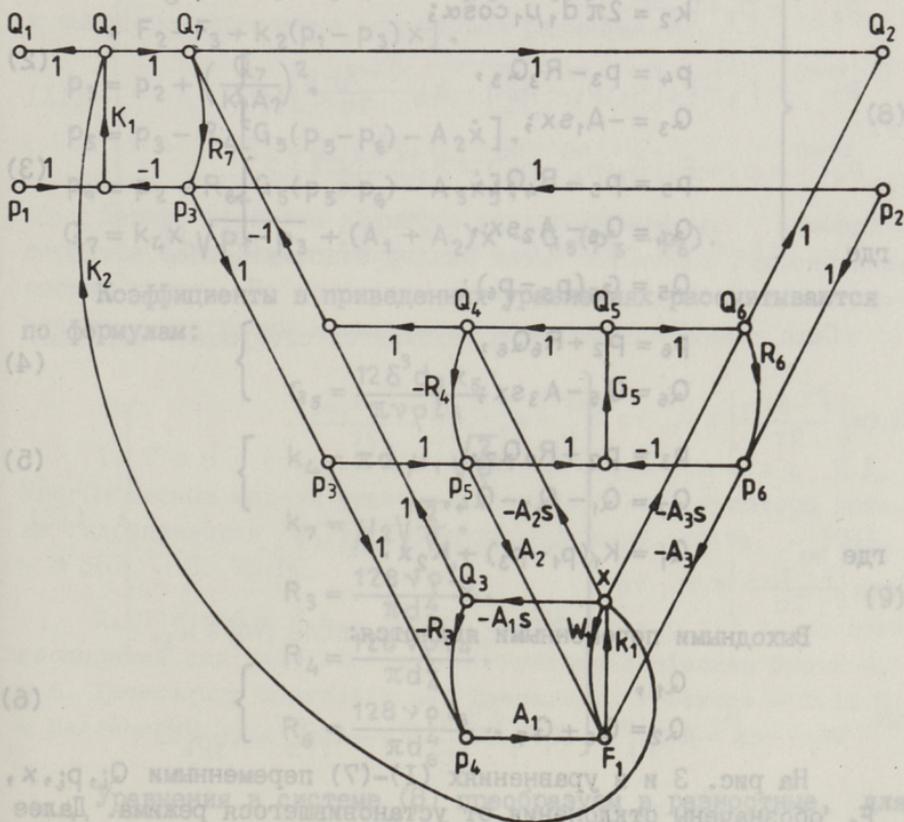


Рис. 3. Развернутый сигнальный граф динамики регулятора потока.

уравнения. С этой целью расщепляются некоторые вершины так, чтобы были разрезаны все контуры. Контуры с нелинейными зависимостями расщепляются в двух вершинах. В данном графе

целесообразно расцепить вершины, соответствующие переменным  $x, p_3, p_5, p_6, Q_7$ .

Выпишем теперь по сигнальному графу динамики на рис. 3 итерационные уравнения попарно в изображениях Лапласа:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= A_1 p_4 + A_2 p_5 - A_3 p_6 + W_1 x, \\ x &= k_1 F_1, \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где

$$W_1 = m s^2 + h s + k_2 (p_1 - p_3),$$

$$k_1 = -\frac{1}{C},$$

$$k_2 = 2\pi d_1 \mu_1 \cos \alpha;$$

$$p_4 = p_3 - R_3 Q_3,$$

$$Q_3 = -A_1 s x;$$

$$p_5 = p_3 - R_4 Q_4,$$

$$Q_4 = Q_5 - A_2 s x,$$

$$Q_5 = G_5 (p_5 - p_6);$$

$$p_6 = p_2 + R_6 Q_6,$$

$$Q_6 = Q_5 - A_3 s x;$$

$$p_3 = p_2 + R_7 Q_7,$$

$$Q_7 = Q_1 - Q_3 - Q_4,$$

где

$$Q_1 = K_1 (p_1 - p_3) + K_2 x.$$

Выходными переменными являются:

$$Q_1,$$

$$Q_2 = Q_6 + Q_7.$$

На рис. 3 и в уравнениях (I)-(7) переменными  $Q_i, p_i, x, F_1$  обозначены отклонения от установившегося режима. Далее составим уравнения относительно переменных  $x, p_3, p_5, p_6, Q_7$ , соответствующих расцепляемым вершинам графа:

$$x = k_1 [A_1 (p_3 + R_3 A_1 s x) + A_2 p_5 - A_3 p_6 + W_1 x],$$

$$p_3 = p_2 + R_7 Q_7,$$

$$\left. \begin{aligned}
 p_5 &= p_3 - R_4 [G_5(p_5 - p_6) - A_2 s x], \\
 p_6 &= p_2 + R_6 [G_5(p_5 - p_6) - A_3 s x], \\
 Q_7 &= K_1(p_1 - p_3) + K_2 x + (A_1 + A_2) s x - G_5(p_5 - p_6).
 \end{aligned} \right\} (7)$$

Преобразуя эти уравнения в уравнения переходных процессов, для чего перейдем к оригиналам, введем нелинейные зависимости и постоянные величины, получим:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{x} &= -\frac{1}{C} [A_1(p_3 + R_3 A_1 \dot{x}) + A_2 p_5 - A_3 p_6 + m \ddot{x} + \\
 &\quad + F_2 - F_3 + k_2(p_1 - p_3) x], \\
 p_3 &= p_2 + \left(\frac{Q_7}{k_7 A_7}\right)^2, \\
 p_5 &= p_3 - R_4 [G_5(p_5 - p_6) - A_2 \dot{x}], \\
 p_6 &= p_2 + R_6 [G_5(p_5 - p_6) - A_3 \dot{x}], \\
 Q_7 &= k_4 x \sqrt{p_1 - p_3} + (A_1 + A_2) \dot{x} - G_5(p_5 - p_6).
 \end{aligned} \right\} (8)$$

Коэффициенты в приведенных уравнениях рассчитываются по формулам:

$$\left. \begin{aligned}
 G_5 &= \frac{12 \delta^3 d_2 k_5}{\pi \nu \rho l_5}, \\
 k_4 &= \pi d_1 \mu_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \\
 k_7 &= \mu_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \\
 R_3 &= \frac{128 \nu \rho l_3}{\pi d_3^4}, \\
 R_4 &= \frac{128 \nu \rho l_4}{\pi d_4^4}, \\
 R_6 &= \frac{128 \nu \rho l_6}{\pi d_6^4}.
 \end{aligned} \right\} (9)$$

Уравнения в системе (8) преобразуем в разностные, для чего производные по времени заменим на отношения в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{x} &\approx \frac{x - x_{j-2}}{2\tau}, \\
 \ddot{x} &\approx \frac{x - 2x_{j-1} + x_{j-2}}{\tau^2},
 \end{aligned} \right\} (10)$$

в которых  $x = x(t_j)$ ,  $x_{j-1} = x(t_j - \tau)$ ,  $x_{j-2} = x(t_j - 2\tau)$ .

Тогда система итерационных уравнений для расчета очередных приближений переменных в момент времени  $t_j$  при определении статических и переходных характеристик регулятора потока приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned} x^{(n+1)} &= -\frac{1}{c} \left[ A_1(p_3^{(n)} + A_1 R_3 \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau}) + A_2 p_5^{(n)} - A_3 p_6^{(n)} + \right. \\ &\quad \left. + m \frac{x^{(n)} - 2x_{j-1} + x_{j-2}}{\tau^2} + F_2^{(n)} - F_3 + k_2(p_1 - p_3^{(n)}) x^{(n)} \right], \\ p_3^{(n+1)} &= p_2 + \left( \frac{Q_7^{(n)}}{k_7 A_7} \right)^2, \\ p_5^{(n+1)} &= p_3 - R_4 \left[ G_5(p_5^{(n)} - p_6^{(n)}) - A_2 \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau} \right], \\ p_6^{(n+1)} &= p_2 + R_6 \left[ G_5(p_5^{(n)} - p_6^{(n)}) - A_3 \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau} \right], \\ Q_7^{(n+1)} &= k_4 x^{(n)} \sqrt{p_1 - p_3^{(n)}} + (A_1 + A_2) \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau} - G_5(p_5^{(n)} - p_6^{(n)}). \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

Сила трения золотника определяется следующим образом.

$$\left. \begin{aligned} \text{Если } \left| \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau} \right| \geq v_1, \text{ то } F_2^{(n)} &= k_3 \operatorname{sign} \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau}. \\ \text{Если } \left| \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau} \right| < v_1, \text{ то } \left\{ \begin{aligned} F_2^{(n)} &= w_2, \text{ если } |w_2| < k_3, \\ F_2^{(n)} &= k_3 \operatorname{sign} w_2, \text{ если } |w_2| \geq k_3, \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (I2)$$

$$\text{где } w_2 = -c x^{(n)} - A_1(p_3^{(n)} + A_1 R_3 \frac{x^{(n)} - x_{j-2}}{2\tau}) - A_2 p_5^{(n)} + A_3 p_6^{(n)} - m \frac{x^{(n)} - 2x_{j-1} + x_{j-2}}{\tau^2} + F_3 - k_2(p_1 - p_3^{(n)}) x^{(n)}.$$

По решениям системы (II) определяются также остальные переменные:

$$\left. \begin{aligned}
 F_1 &= -cX^{(n+1)}, \\
 Q_3 &= -A_1 \frac{X^{(n+1)} - X_{j-2}}{2\tau}, \\
 P_4 &= p_3^{(n+1)} - R_3 Q_3, \\
 Q_5 &= G_5 (p_5^{(n+1)} - p_6^{(n+1)}), \\
 Q_4 &= Q_5 - A_2 \frac{X^{(n+1)} - X_{j-2}}{2\tau}, \\
 Q_6 &= -A_3 \frac{X^{(n+1)} - X_{j-2}}{2\tau} + Q_5
 \end{aligned} \right\} \quad (I3)$$

и выходные переменные получаютя равными:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_1 &= k_4 X^{(n+1)} \sqrt{p_1 - p_3^{(n+1)}}, \\
 Q_2 &= Q_7^{(n+1)} + Q_6.
 \end{aligned} \right\} \quad (I4)$$

Данная методика является универсальной, по которой строятся математические модели любых элементов гидромеханических систем. По приведенным математическим моделям составлены программы и выполнены расчеты на ЭЕМ.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г р о с с ш м и д т Г.Т., П а х а п и л л ь Я.А. Многополюсные модели расчета характеристик регулятора потока гидроприводов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1983. - № 553. - С. 75-90.
2. G r o v s c h m i d t G., P a h a p i l l J. Programmpaket zur Modellierung der hydromechanischen Systeme. - 6. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge - Teil 3. - Magdeburg, DDR, 1985. - S. 609-617.

E. Pais,  
J. Vanaveski

Aufbau der mathematischen Modelle für  
Iterationsberechnung des Prozessverlaufs  
der Funktionalelemente der hydromechanischen  
Systeme

Zusammenfassung

Auf Grund des Beispiels des Stromregelventils der allgemeinen hydraulischen Antriebe ist die Folgereihe der Tätigkeiten für Zusammenstellen des Iterationsgleichungssystems der Prozessverlaufberechnung von Funktionalelementen der hydromechanischen Systeme festgestellt. Es wird ein Universalmodul der Berechnung von statischen Kennlinien, der Frequenzkennlinien und des Prozessverlaufs beschrieben.

ПОСТРОЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## Введение

Существует целый ряд инструментальных систем программирования для построения программного обеспечения САПР, а уровень развития вычислительной техники, программирования и численных методов позволяет успешно реализовать на ЭВМ модели любой сложности и проводить на них вычислительные эксперименты.

Обычно большие комплексы программ оформляются как пакеты программ со своим монитором и входным языком. Эти пакеты обеспечивают решение задач из некоторой области человеческих знаний, называемых предметной областью пакета. Для накопления знаний о предметной области существуют различные возможности [1]. Например, в системе ПРИЗ [2] модель знаний строится из понятий данной предметной области. Понятие — это вычислительная модель, содержащая совокупность объектов (переменных) и связывающих значения этих объектов отношений. Такая модельная база знаний позволяет проводить вычисления по запросам. При трансляции входного языка каждому предложению ставится в соответствие некоторая вычислительная модель, вычленяемая из модели предметной области с помощью копирования и объединения понятий.

Если в процедурных системах программирования необходимо явно указать, каким образом отдельные модули объединены и в какой последовательности они вызываются, то в системе ПРИЗ описание задачи сводится к описанию условий задачи. Преимущество такого описания перед процедурными описаниями в том, что не надо задавать явно алгоритм решения, а он составляется синтезатором автоматически.

## Вычислительные модели

Вычислительной моделью  $M=(X,R)$  называется совокупность переменных  $X$  и совокупность отношений  $R$  между ними. Отношения могут быть представлены в виде уравнений или подпрограмм. Отношения и подпрограммы применяются для вычисления значений одних переменных (выходных) по значениям других переменных (входных). Отношение или подпрограмма применима, если входные переменные для нее вычислимы и ее подзадачи разрешимы.

Задача на вычислительной модели  $M$  определяется как тройка  $(M,U,V)$ , где  $M$  – вычислительная модель,  $U$  – множество входных и  $V$  – множество искомых переменных задачи. Вычислительная задача разрешима, если из входных переменных  $U$  можно вычислить выходные переменные  $V$ .

На виды переменных система ПРИЗ не налагает никаких ограничений. Следовательно, в качестве значений некоторых переменных можно использовать программы, синтезируемые на этой же модели. Отношение, входным параметром которого является синтезированная программа, называется отношением с подзадачей (входы подзадачи описываются с помощью ARG и выходы с помощью RES).

### Пример I.

Пусть дана нелинейная система уравнений  $F(X)=0$ . Для решения системы применяется метод Ньютона, который реализован в виде подпрограммы NEWTON. Описание понятия FEEDBACK для решения нелинейных систем уравнений следующее:

```
LET' FEEDBACK : (  
    INIT : UNDEF' ;  
    EPS : REAL' ;  
    NC,NX : INT' ;  
    X : UNDEF' ;  
    N : INT' ;  
    F : UNDEF' ;  
MOD' NEWTON IN' INIT,EPS,NC,NX  
    OUT' X,N  
    ARG' X  
    RES' F ) ;
```

где FEEDBACK - имя понятия;

- INIT - начальная точка поиска;
- EPS - условие сходимости;
- NC - число итераций;
- NX - порядок системы уравнений;
- N - номер подзадачи (см. пример 3);
- X - приближения аргументов функций F на k-м шаге итерации;
- F - значения функций в точке  $X^{(k)}$ .

Фактически в подпрограмме NEWTON описана подзадача, где X является ее входом, а F выходом.

Типы объектов INIT, X и F в примере I не определены (их тип UNDEFINED). Их тип задается позже при описании нового объекта с помощью понятия FEEDBACK. Такое построение понятий (с неопределенными объектами) позволяет получить их более общими и использовать в качестве прототипа для разных объектов. В примере I был описан объект FEEDBACK для решения системы уравнений любого порядка. В примере 4 показано, как использовать его для конкретного случая.

#### Описание отдельных элементов гидромеханических систем

Языком описания функциональных элементов гидромеханических систем является входной язык системы ПРИЗ УТОПИСТ. Язык УТОПИСТ - это объектно-ориентированный язык высокого уровня. Он позволяет описать проблему в виде объекта и поставить задачи на этом объекте с указанием, какие компоненты заданы и какие искомые. Язык УТОПИСТ расширяемый, т.е. в язык можно добавить новые конструкции (объекты) и применить их потом в качестве описателей для задания типа вновь списываемых объектов.

Модель гидромеханического элемента на языке УТОПИСТ состоит из объектов (элементарных или составных) и отношений между ними. Отношения задаются либо в виде уравнений, либо в виде подпрограмм. Описание подпрограммы начинается словом MOD. Далее описываются его входные (IN) и выходные (OUT) параметры. Если в модуле описана подзадача, то задаются и ее входы (ARG) и выходы (RES) (см. примеры

I и 3). В качестве математических моделей здесь используются многополюсные модели гидромеханических элементов [3].

Для работы с базой знаний имеются директивы INSERT - ввод новых понятий в базу знаний, DELETE - удаление понятий, FROM - выделение для работы некоторой части базы знаний.

### Пример 2.

Модели расчета статических характеристик трубопровода (TU1) и квадратичного местного гидравлического сопротивления (RR4) (рис. 1) [4].

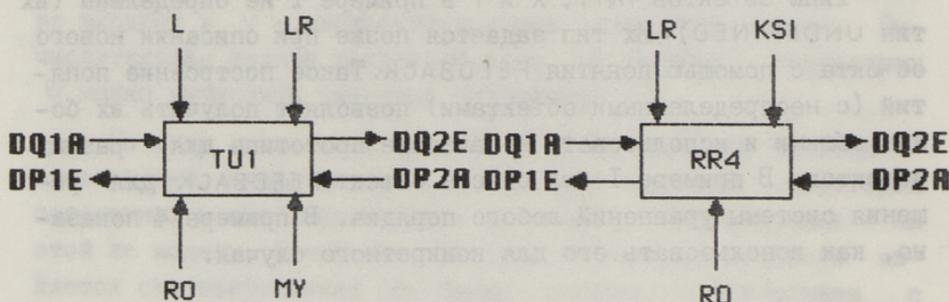


Рис. 1. Входы-выходы многополюсных моделей функциональных элементов.

Математическая модель	Вычислительная модель
-----------------------	-----------------------

Обобщенное гидравлическое сопротивление трубопровода:

$$R = R_{L0} + R_{T0} Q_{1A}$$

Ламинарное гидравлическое сопротивление трубы:

$$R_{L0} = \frac{A \nu \rho}{4 \pi r^3}$$

$$A = \frac{75 l}{2 r}$$

Турбулентное гидравлическое сопротивление трубы:

$$R_{T0} = \frac{0.04 l \rho}{4 \pi^2 r^5}$$

LET' TU1 ; (  
P2A, Q1A, P1E, Q2E, R, RLO,  
RTO, A, NY, RO, L, LR : REAL' ;

MOD' TU1HO IN' P2A, Q1A, R  
OUT' P1E, Q2E;

ASS' R:=RLO+RTO\*Q1A;  
ASS' RLO:=(A\*NY\*RO)/(4\*3.14\*(LR\*\*3));  
ASS' RTO:=0.04\*L\*RO/(4\*3.14\*\*2\*LR\*\*5);  
ASS' A:=75\*L/(2\*LR) ;

INSERT' TU1;+++

Уравнения:

$$Q_{2E} = Q_{1A}$$

$$P_{1E} = P_{2A} + R Q_{1A}$$

Квадратичное местное гидравлическое сопротивление:

$$R = \frac{\xi \rho}{2 \pi^2 r^4}$$

```
LET' RR4 : (
  P2A,Q1A,P1E,Q2E,R,
  KSI,LR,RO : REAL';
```

```
ASS' R:=KSI*RO/(2*3.14**2*LR**4);
```

```
MOD' RR4HO IN' P2A,Q1A,RO
      OUT' P1E,Q2E );
```

Уравнения:

$$Q_{2E} = Q_{1A}$$

$$P_{1E} = P_{2A} + R Q_{1A}^2 \text{ sign}(Q_{1A})$$

```
INSERT' RR4;+++
```

Программные модули могут быть написаны на ФОРТРАНе или на языке Ассемблера.

### Пример 3.

Описание подзадачи в программном модуле (см. пример I) следующее:

```
SUBROUTINE NEWTON(XO, EPS, NCOMP, NX, Y, N1, XA, FA)
```

```
CALL SYSPRZ(N1, XA, FA)
```

```
END
```

Система автоматически устанавливает следующее соответствие между переменными:

```
XO ... INIT
```

```
EPS ... EPS
```

```
NCOMP ... NC
```

```
NX ... NX
```

```
Y ... X
```

```
N1 ... N
```

```
XA ... X
```

```
FA ... F
```

В описании процедуры SYSPRZ первым параметром является номер задачи N1, который устанавливается автоматически системой. Все параметры процедуры SYSPRZ должны быть формальными параметрами модуля. Их порядок должен совпадать

с порядком в вызове процедуры SYSPRZ. Вызов процедуры SYSPRZ определяет следующие действия (см. и пример 4):

1) Переменным предметной области присваиваются значения переменных на базовом языке (на ФОРТРАНе или на языке Ассемблера).

В примере объекту T.P2A предметной области присваивается значение переменной XA (в подпрограмме NEWTON).

2) Вычисление новых значений переменным предметной области.

В примере объекту R.P1E вычисляется новое значение.

3) Новые значения переменных предметной области передаются в программу на базовом языке и присваиваются некоторым переменным в этой программе.

Новое значение объекта R.P1E передается в подпрограмму NEWTON и присваивается переменной FA.

#### Описание гидромеханических схем

Рассмотрим, как использовать систему ПРИЗ при описании некоторой гидромеханической системы. В базу знаний введены такие понятия предметной области как трубопровод TU1, местное гидравлическое сопротивление с насыщением RR4 и FEEDBACK для описания и решения системы уравнений. Пусть система состоит из двух элементов (рис. 2,а): из трубопровода длиной  $L = 100$  см, внутренним радиусом  $LR = 1$  см и из местного сопротивления внутренним радиусом  $LR = 0,05$  см. Из теории гидравлических многополюсников известно, что при стыковке двух четырехполюсников между ними образуется контур, который необходимо решать итеративно. Описание и решение этих контуров осуществляется понятием FEEDBACK (рис. 2,в). Описание системы на расширенном языке УТОПИСТ показано в примере 4.

#### Пример 4

```
LET' TRACE : (  
RO : REAL';  
ASS' RO:=860;
```

**T** : TU1 RO=RO,NY=20,L=100,LR=1,Q1A=100;  
**R** : RR4 Q1A=T.Q2E,RO=RO,KSI=1.8,LR=0.05,P2A=10;  
**FB** : FEEDBACK INIT=10,EPS=1E-4,NC=5,NX=1,  
           X=T.P2A,F=R.P1E);

Теперь остается лишь сказать системе, что именно необходимо вычислить. Пусть нас интересует давление на входе трубопровода. Если задача является семантически правильной, т.е. она разрешима, то система автоматически синтезирует программу решения и запускает ее.

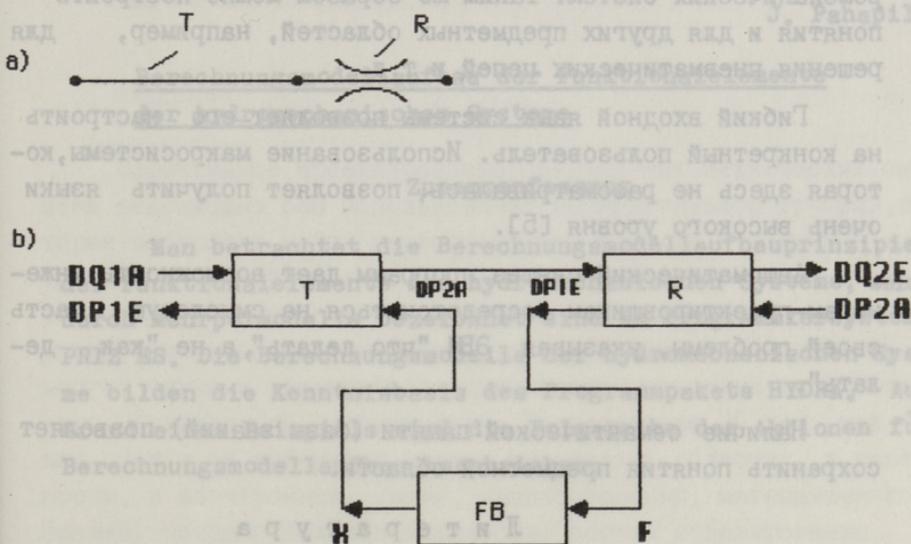


Рис. 2. Схемы к описанию системы для примера 4.

### Пример 5

ACT'

ON' TRACE COMPUTE' T.P1E;  
 END' ;+++

Существует возможность сохранения синтезированной программы в виде подпрограммы в библиотеке загрузочных модулей. Имя библиотеки указывают в управляющих картах при запуске системы.

### Пример 6.

```
SUBROUTINE' TRACE(T.P1E);  
ON' TRACE COMPUTE' T.P1E;  
END' ;+++
```

### Заключение

В данной статье коротко изложены основные идеи и возможности использования системы ПРИЗ для моделирования гидромеханических систем. Таким же образом можно построить понятия и для других предметных областей, например, для решения пневматических цепей и т.д.

Гибкий входной язык системы позволяет его настроить на конкретного пользователя. Использование макросистемы, которая здесь не рассматривалась, позволяет получить языки очень высокого уровня [5].

Автоматический синтез программ дает возможность инженерам-проектировщикам сосредоточиться на смысловую часть своей проблемы, указывая ЭВМ "что делать", а не "как делать".

Наличие семантической памяти (базы знаний) позволяет сохранить понятия предметной области.

### Л и т е р а т у р а

1. Ты у г у Э.Х. Концептуальное программирование. - М.: Наука, 1984. - 255 с.

2. Ка х р о М.И., Ка л ь я А.П., Ты у г у Э.Х. Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ(ПРИЗ). - М.: Финансы и статистика, 1981. - 158 с.

3. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Принципы построения математических моделей гидромеханических цепных систем (см. наст. об., с. 3-13).

4. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Четырехполюсные модели элементов гидравлических трасс гидроприводов для расчета частотных характеристик. Неустановившееся движение жидкости в трубах // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1980. - № 485. - С. 41-50.

Б. Пахапиль Я.А., Гроссшmidt Г.Т.  
Пакет программ для моделирования гидромеханических систем  
(см. наст. сб., с. 47-56).

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 62-82-53.001.573

Я.А. Пахапиль, Г.Т. Гроссшmidt

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

J. Pahapill

Berechnungsmodellaufbau der Funktionalelemente  
der hydromechanischen Systeme

Zusammenfassung

Man betrachtet die Berechnungsmodellaufbauprinzipien der Funktionalelemente der hydromechanischen Systeme, welche durch Mehrpolmodelle bezeichnet sind im Programmiersystem PRIZ ES. Die Berechnungsmodelle der hydromechanischen Systeme bilden die Kenntnisbasis des Programmpakets HYDRA. Auf Grund eines Beispiels wird die Folge der Aktionen für Berechnungsmodellaufbau beschrieben.

Эффективное проектирование сложных технических систем невозможно без использования многополюсной техники, которая

Man betrachtet die Berechnungsmodellaufbauprinzipien der Funktionalelemente der hydromechanischen Systeme, welche durch Mehrpolmodelle bezeichnet sind im Programmiersystem PRIZ ES. Die Berechnungsmodelle der hydromechanischen Systeme bilden die Kenntnisbasis des Programmpakets HYDRA. Auf Grund eines Beispiels wird die Folge der Aktionen für Berechnungsmodellaufbau beschrieben.

Гидромеханическим системам привода и управления свойственна преимущественно цепная структура. Такие системы, кроме передачи воздействий в прямом направлении, оказывают реакцию и в обратном направлении. Поэтому наиболее естественно иметь многополюсные модели гидромеханических элементов, которые позволяют учитывать передачу возмущений в нескольких направлениях [1].

С увеличением мощности ЭВМ и появлением инструментальных систем построения пакетов программ появится возможность реализовать на ЭВМ сложные математические модели динамических систем, в том числе гидромеханических, и повысить качество их проектирования. С этой целью на основе современных методов структурного синтеза программ [2] разработан



Я.А. Пахапилль, Г.Т. Гроссшмидт

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## Введение

Эффективное проектирование современных технических систем невозможно без использования вычислительной техники, которая позволяет найти наивыгоднейшие решения с малыми затратами и за короткие сроки. Новых форм организации математического обеспечения требует также возрастающая роль в научных исследованиях численного эксперимента, который во многих случаях оказывается единственной альтернативой натурального, физического эксперимента. За последние 25 лет как у нас, так и за рубежом в разных прикладных областях, в частности, в электронике, химии, машиностроении, математической физике, создано большое количество систем моделирования, появление которых обусловлено развитием вычислительной техники, программирования и численных методов.

Гидромеханическим системам привода и управления свойственна преимущественно цепная структура. Такие системы, кроме передачи воздействий в прямом направлении, оказывают реакцию и в обратном направлении. Поэтому наиболее естественно иметь многополюсные модели гидромеханических элементов, которые позволяют учитывать передачу возмущений в нескольких направлениях [1].

С увеличением мощности ЭВМ и появлением инструментальных систем построения пакетов программ появится возможность реализовать на ЭВМ сложные математические модели динамических систем, в том числе гидромеханических, и повысить качество их проектирования. С этой целью на основе современных методов структурного синтеза программ [2] разработан

пакет программ HYDRA, с помощью которого можно осуществлять трудоемкие расчеты характеристик гидромеханических систем произвольной структуры.

Системная часть пакета программ базируется на инструментальной системе программирования ПРИЗ ЕС [3]. Функциональное наполнение пакета составлено с использованием новых принципов построения математических моделей гидромеханических систем. Эти принципы описаны в источнике [1].

### Структура пакета программ

Структура пакета программ приведена на рис. 1. В пакете программ выделяются тело пакета и организующая программа. Тело пакета - это часть, зависящая от предметной области и решаемых задач. Организующая программа обеспечивает функционирование пакета программ.

Тело пакета состоит из следующих частей:

БЗ - база знаний пакета программ, которая содержит описания отдельных элементов и устройств гидромеханических систем;

МАКЕТЫ - макеты ввода-вывода;

БД - база данных пакета программ.

Для функционирования пакета программ необходимы следующие аппаратные средства:

- не менее 256 Кбайт оперативной памяти;
- системный ввод;
- два устройства со сменными дисками;
- операторская консоль;
- алфавитно-цифровой дисплей типа ЕС-7906 или ЕС-7920;
- графопостроитель с рабочим полем не менее 500x300 мм (например, ЕС-7051).

### Методы решения

Для расчета характеристик гидромеханических систем используется двухуровневый метод. На первом уровне рассчитываются отдельные аппараты конкретной гидромеханической системы. На втором уровне согласуются межаппаратные потенциальные переменные (давления) для достижения общего решения всей системы.

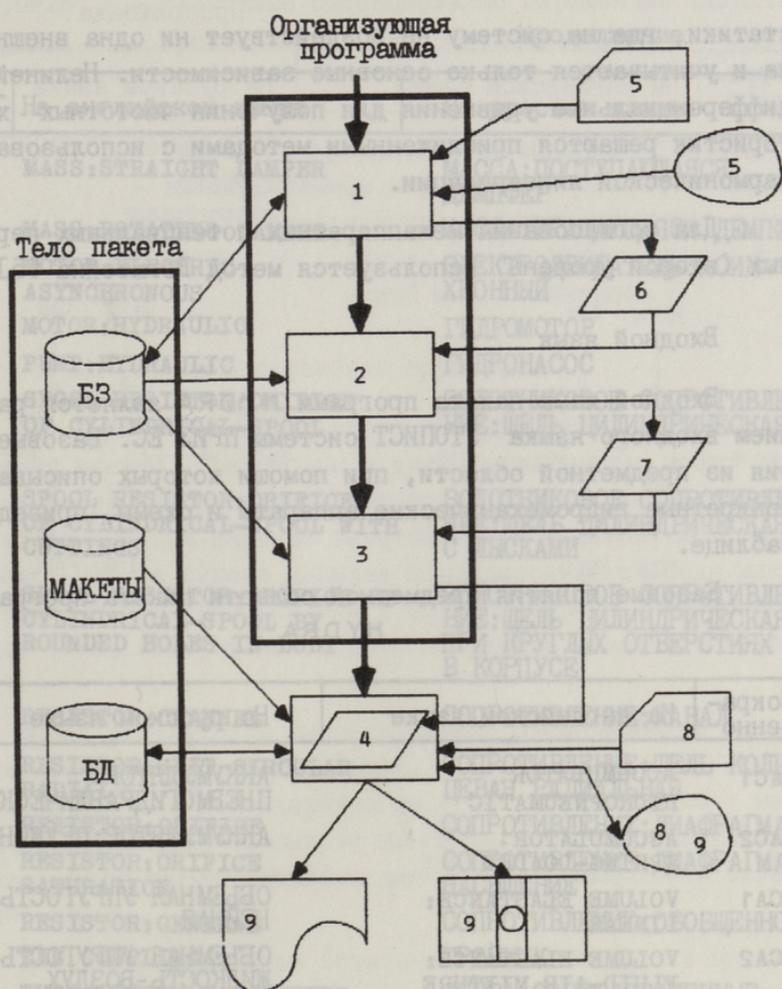


Рис. 1. Структурная схема пакета программ HYDRA.

Легенда: 1 - транслятор; 2 - планировщик; 3 - компилятор; 4 - рабочая программа; 5 - текст задачи; 6 - внутреннее описание задачи; 7 - алгоритм; 8 - исходные данные; 9 - результаты. —> - информационные связи. —> - управление.

Системы уравнений представляются на входном языке пакета. Чтобы облегчить планирование, в описание системы на входном языке вводится явно блок обратной связи.

Расчет статических и динамических характеристик на аппаратном (первом) уровне осуществляется по методу Ньютона-Рафсона модификации Бройдена [4]. Начальные значения итерлируемых переменных вычисляются по упрощенным уравнениям

статики, где на систему не воздействует ни одна внешняя сила и учитываются только основные зависимости. Нелинейные дифференциальные уравнения для получения частотных характеристик решаются приближенными методами с использованием гармонической линеаризации.

Для согласования межаппаратных потенциальных переменных (второй уровень) используется метод Вегштейна [5].

Входной язык

Входной язык пакета программ HYDRA является расширением входного языка УТОПИСТ системы ПРИЗ ЕС. Базовые понятия из предметной области, при помощи которых описываются конкретные гидромеханические аппараты и схемы, приведены в таблице.

Базовые понятия предметной области пакета программ  
HYDRA

Сокращенно	На английском языке	На русском языке
AC1	ACCUMULATOR: HYDROPNEUMATIC	АККУМУЛЯТОР: ПНЕМОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ
AC2	ACCUMULATOR: SPRING-LOADED	АККУМУЛЯТОР: ПРУЖИННЫЙ
CA1	VOLUME ELASTANCE: LINEAR	ОБЪЕМНАЯ УПРУГОСТЬ: ЛИ- НЕЙНАЯ
CA2	VOLUME ELASTANCE: FLUID-AIR MIXTURE	ОБЪЕМНАЯ УПРУГОСТЬ: СМЕСЬ ЖИДКОСТЬ-ВОЗДУХ
CY1	CYLINDER: SINGLE-ACTING MOVING PISTON FIXING RIGHT BACKLASH	ЦИЛИНДР: ОДНОСТОРОННЕЕ ДЕЙСТВИЕ, ПЕРЕМЕЩАЕТСЯ ПОРШЕНЬ КРЕПЛЕНИЕ ПРАВОЕ ЛЮФТ
CY2	CYLINDER: DOUBLE-ACTING MOVING PISTON THROUGH-ROD FIXING RIGHT BACKLASH	ЦИЛИНДР: ДВУХСТОРОННЕЕ ДЕЙСТВИЕ, ПЕРЕМЕЩАЕТСЯ ПОРШЕНЬ ШТОК ДВУХСТО- РОННИЙ КРЕПЛЕНИЕ ПРАВОЕ ЛЮФТ
EL1	ELASTANCE: STRAIGHT LINEAR	УПРУГОСТЬ: ПОСТУПАТЕЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ
EL2	ELASTANCE: TORSIONAL LINEAR	УПРУГОСТЬ: КРУТИЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ
FC1	FLOW CONTROL VALVE: WITHOUT SPILL-OFF	РЕГУЛЯТОР ПОТОКА: ДВУХ- ХОДОВОЙ
FC2	FLOW CONTROL VALVE: SPILL-OFF	РЕГУЛЯТОР ПОТОКА: ТРЕХ- ХОДОВОЙ

Сокращенно	На английском языке	На русском языке
ID1	MASS:STRAIGHT DAMPER	МАССА:ПОСТУПАЮЩАЯ ДЕМПФЕР
ID2	MASS:ROTATING DAMPER	МАССА:ВРАЩАЮЩАЯСЯ ДЕМПФЕР
ME1	MOTOR:ELECTRIC ASYNCHRONOUS	ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ:АСИНХРОННЫЙ
MH1	MOTOR:HYDRAULIC	ГИДРОМОТОР
PH1	PUMP:HYDRAULIC	ГИДРОНАСОС
RS1	SPOOL RESISTOR:ORIFICE OF CYLINDRICAL-SPOOL	ЗОЛОТНИКОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ:ЩЕЛЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ
RS2	SPOOL RESISTOR:ORIFICE OF CYLINDRICAL-SPOOL WITH CUTTINGS	ЗОЛОТНИКОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ:ЩЕЛЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ С ЛЫСКАМИ
RS3	SPOOL RESISTOR:ORIFICE OF CYLINDRICAL-SPOOL BY ROUNDED HOLES IN BODY	ЗОЛОТНИКОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ:ЩЕЛЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ПРИ КРУГЛЫХ ОТВЕРСТИЯХ В КОРПУСЕ
RR1	RESISTOR:CHANNEL	СОПРОТИВЛЕНИЕ:КАНАЛ
RR2	RESISTOR:SLIT CIRCULAR RADIAL	СОПРОТИВЛЕНИЕ:ЩЕЛЬ КОЛЬЦЕВАЯ РАДИАЛЬНАЯ
RR3	RESISTOR:ORIFICE	СОПРОТИВЛЕНИЕ:ДИАФРАГМА
RR4	RESISTOR:ORIFICE SATURATION	СОПРОТИВЛЕНИЕ:ДИАФРАГМА НАСЫЩЕНИЕ
RR5	RESISTOR:GENERAL	СОПРОТИВЛЕНИЕ:ОБОБЩЕННОЕ
TC	TEE COUPLING	ТРОЙНИК
TU1	TUBE:LUMPED PARAMETERS	ТРУБА:СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ
TU2	TUBE:LUMPED PARAMETERS FIRST RESONANCE TOP	ТРУБА:СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРВЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ПИК
TU3	TUBE:DISTRIBUTED PARAMETERS	ТРУБА:РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ
VP1	PRESSURE VALVE: DIRECT-ACTING	КЛАПАН ДАВЛЕНИЯ:ПРЯМОЕ ДЕЙСТВИЕ
VP2	PRESSURE VALVE: INDIRECT-ACTING	КЛАПАН ДАВЛЕНИЯ:НЕПРЯМОЕ ДЕЙСТВИЕ
FLUID	FLUID	ЖИДКОСТЬ
DIST1	DISTURBANCE:STEP	ВОЗМУЩЕНИЕ:СКАЧКООБРАЗНОЕ
DIST2	DISTURBANCE:SINUSOID	ВОЗМУЩЕНИЕ:СИНУСОИДАЛЬНОЕ

Сокращенно	На английском языке	На русском языке
DIST3	DISTURBANCE:RECTANGLE	ВОЗМУЩЕНИЕ:ПРЯМОУГОЛЬНОЕ
UNITS	UNITS	ЕДИНИЦЫ
VARIABLE	VARIABLE	ПЕРЕМЕННЫЕ

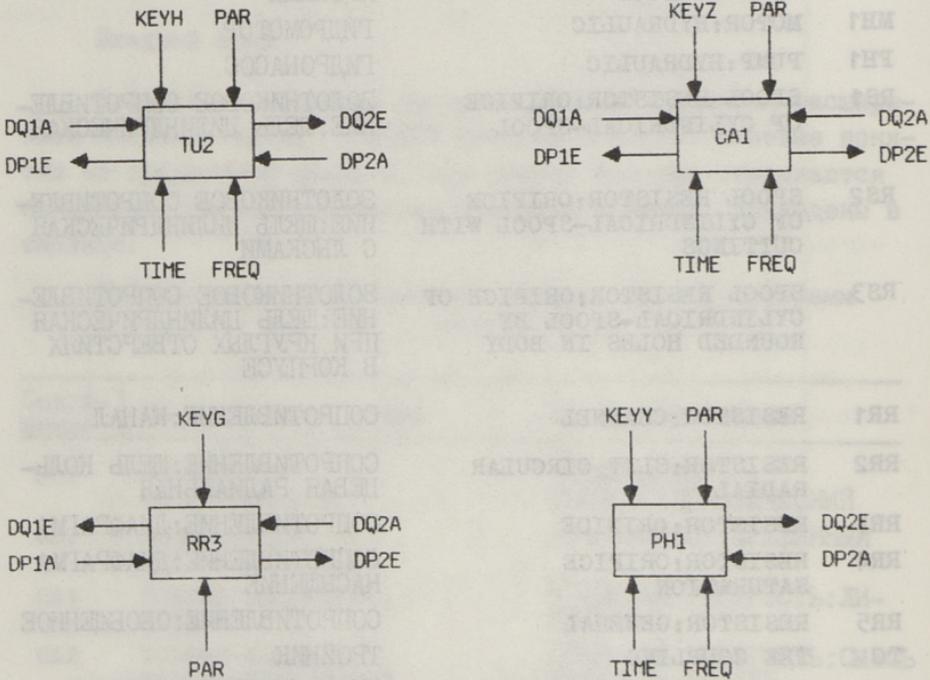


Рис. 2. Блок-схемы некоторых базовых понятий пакета программ HYDRA.

С помощью преобразователя единиц ввод данных и вывод результатов могут быть осуществлены в различных системах измерений.

На рис. 2 показаны некоторые блок-схемы базовых понятий. Приняты следующие обозначения:

- DQ1E, DQ2E - зависимые потоковые переменные (объемные расходы);
- DQ1A, DQ2A - независимые потоковые переменные (объемные расходы);

- DP1E, DP2E - зависимые потенциальные переменные (давления);  
 DP1A, DP2A - независимые потенциальные переменные (давления);
- TIME - время;
- FREQ - частота вынужденных гармонических колебаний;
- PAR - конструктивные параметры аппаратов и параметры, характеризующие рабочую жидкость;
- KEYU, KEYZ, KEYN, KEYG - ключи, определяющие форму уравнений многополюсника.

### Режимы работы и сервисные средства

Для работы с пакетом программ существуют диалоговый и пакетный режимы. При работе в диалоговом режиме ввод параметров исследуемой гидромеханической системы может осуществляться с помощью заранее заготовленных макетов. Во время сеанса с ЭВМ на экране дисплея появляются по очереди макеты. Для ввода параметров системы в макетах отведены соответствующие окна, которые необходимо заполнить данными и ввести макет.

Вывод результатов вычислительных экспериментов осуществляется либо на экран дисплея, либо на АЦПУ. При выводе на экран дисплея используется заранее заготовленный макет вывода. При выводе таблиц их пояснительная часть генерируется автоматически по описанию данных, содержащихся в базе знаний пакета.

Для вывода графиков (статических, частотных и переходных характеристик) имеются средства графического вывода на графопостроитель. Все графики, выводимые на графопостроитель, изображаются в формате А4, при этом используется автоматическое масштабирование обеих осей. При выводе частотных характеристик выводятся две кривые (амплитудная и фазовая частотная характеристика), которые помещаются в одно поле рисунка, причем обе функции имеют независимые шкалы для значений.

### Пример

На рис. 3 приведена принципиальная схема подсистемы питания гидравлического привода. Ее блок-схема из многополюсных элементов при давлениях на входах показана на рис. 4.

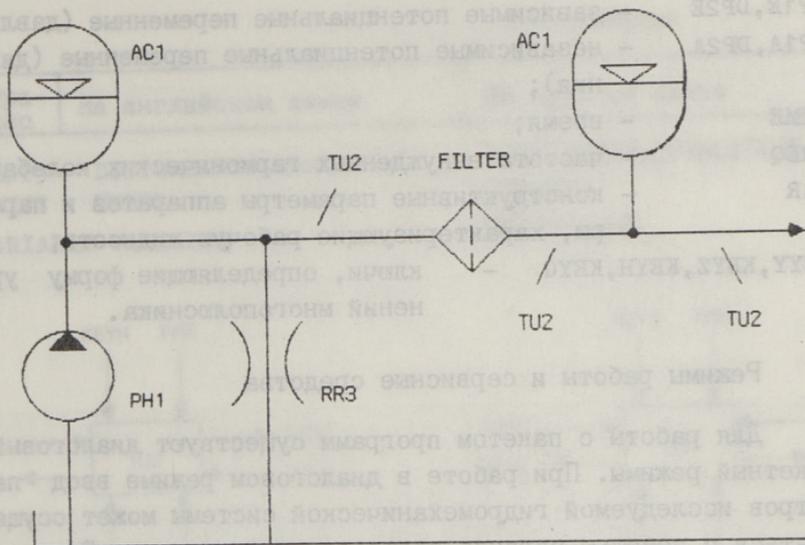


Рис. 3. Принципиальная схема подсистемы питания гидравлического привода.

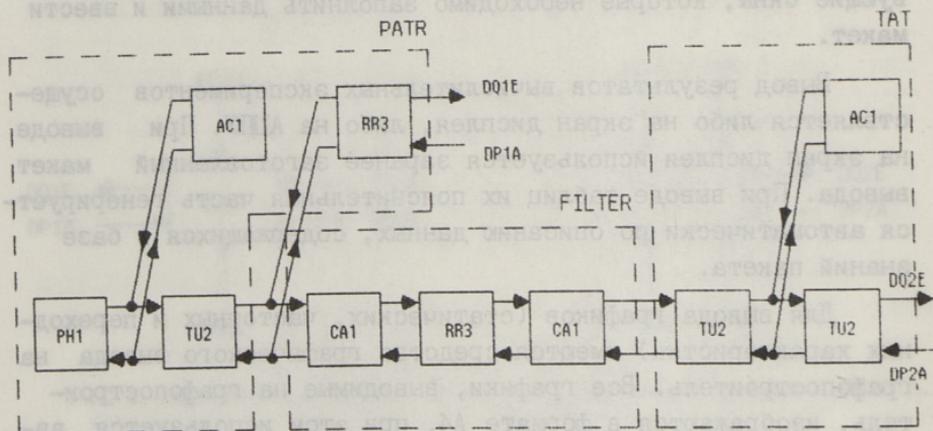


Рис. 4. Блок-схема многополюсной модели подсистемы питания гидравлического привода.

Подсистему питания необходимо рассматривать как состоящую из следующих более простых подсистем:

PATR : PH1 - AC1 - TU2 - RR3

FILTER : CA1 - RR3 - CA1

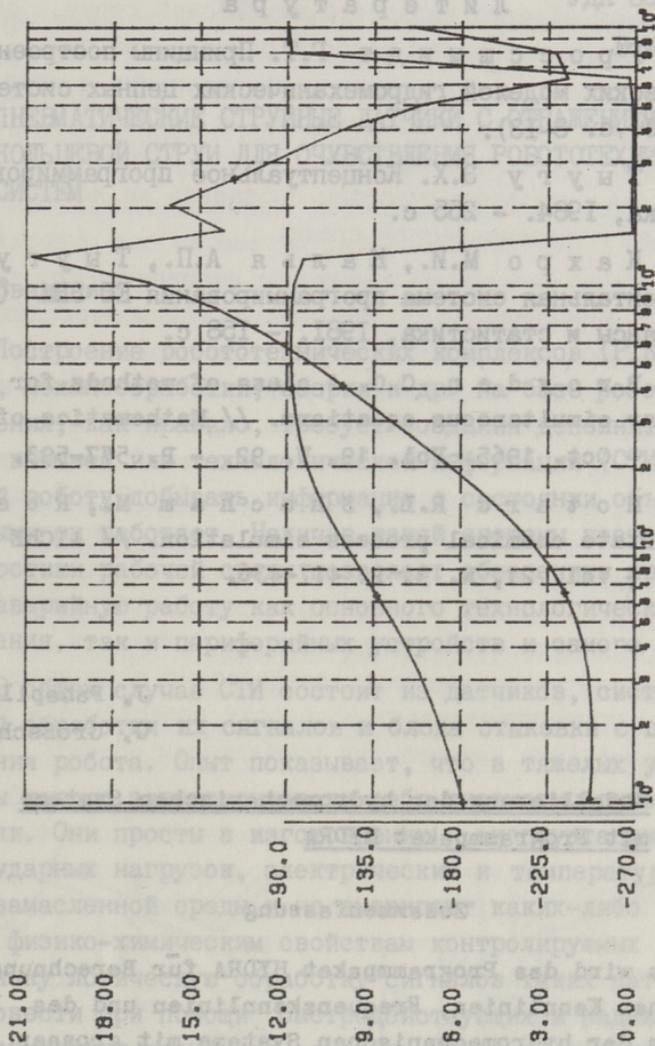
TAT : TU2 - AC1 - TU2

Принятые значения входных переменных:

$$p_{10} = 1 \text{ кгс/см}^2, \quad \Delta p_1 = 0 \text{ кгс/см}^2, \quad p_{20} = 50 \text{ кгс/см}^2,$$

\*\*\* HYDRA \*\*\*

OBJECT : FEEDING



Y-AXIS : AMPL. & PHASE DLO & DEG  
X-AXIS : FREQUENCY 1/S

Рис. 5. Частотные характеристики подсистемы питания гидравлического привода.

$\Delta p_2 = 3 \text{ кгс/см}^2$ . Полученные частотные характеристики  $\Delta T(j\omega) = \Delta Q_2(j\omega) / \Delta p_2(j\omega)$ , вычерченные графопостроителем, показаны на рис. 5.

### Л и т е р а т у р а

1. Г р о с с ш м и д т Г.Т. Принципы построения математических моделей гидромеханических цепных систем (см. наст. сб., с. 3-13).

2. Т ы у г у Э.Х. Концептуальное программирование. - М.: Наука, 1984. - 255 с.

3. К а х р о М.И., К а л ь я А.П., Т ы у г у Э.Х. Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ). - М.: Финансы и статистика, 1981. - 158 с.

4. B r o y d e n C.G. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. // Mathematics of Computation. - Oct. 1965.-Vol. 19, N. 92. - P. 577-593.

5. M o t a r d R.L., S h a c h a m M., R o s e n E.M. Steady state chemical process simulation. // AIChE Journal. - 1975, - Vol. 21, N. 3.-P. 417-436.

J. Pahapill,  
G. Großschmidt

### Modellierung der hydromechanischen Systeme mit Programmpaket HYDRA

#### Zusammenfassung

Es wird das Programmpaket HYDRA für Berechnung der statischen Kennlinien, Frequenzkennlinien und des Prozessverlaufs der hydromechanischen Systeme mit grosser Komplexiertheit beschrieben. Das Programmpaket benutzt das Modulprinzip des Berechnungsmodellbaus. Das Paket ist im Instrumentalprogrammierungssystem PRIZ ES realisiert. Die Berechnungen werden mit Iterationsverfahren durchgeführt. Es ist ein Benutzungsbeispiel des Programmpakets gebracht.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СТРУЙНЫЕ ДАТЧИКИ С ОТРАЖЕНИЕМ  
КОЛЬЦЕВОЙ СТРУИ ДЛЯ ОЧУВСТВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ

Введение

Построение робототехнических комплексов (РТК) для штамповки, механообработки, сборки и др. на базе роботов I-го поколения, как правило, требует создания дополнительной системы внешней или технологической информации (СТИ), позволяющей роботу добывать информацию о состоянии объектов, с которыми он работает. Наличие такой системы постоянной диагностики рабочей среды позволяет обеспечить правильную и безаварийную работу как основного технологического оборудования, так и периферийных устройств и самого робота.

В общем случае СТИ состоит из датчиков, системы логической обработки их сигналов и блока стыковки с пультом управления робота. Опыт показывает, что в тяжелых условиях работы хорошо зарекомендовали себя пневматические струйные датчики. Они просты в изготовлении и эксплуатации, не боятся ударных нагрузок, электрических и температурных полей, замасленной среды и не выдвигают каких-либо требований к физико-химическим свойствам контролируемых объектов. Поскольку логическую обработку сигналов таких датчиков можно провести при помощи быстродействующих и надежных струйных логических элементов, а связь СТИ с электронной системой управления роботом можно осуществлять через малоинерционные пневмоэлектрические преобразователи аэродинамического действия, то быстродействие такой системы в условиях РТК вполне устраивает.

Проблемы разработки и применения в РТК пневматических струйных датчиков с отражением струи

Из всех струйных датчиков наличия и расположения объекта большее распространение в РТК получили датчики на базе отражения от объекта кольцевой конической струи, основные геометрические параметры которых показаны на рис. 1. Основным преимуществом этих датчиков по сравнению с другими типами датчиков является возможность их работы с расстояния, не мешающего захватным органам. В этом отношении только оптоэлектронные датчики способны составить им конкуренцию, но это только в незамазленной среде.

Несмотря на то, что датчики с отражением от объекта кольцевой фокусированной, цилиндрической и расходящейся струи используются в технике уже с конца 60-х годов, до сегодняшнего дня наблюдаются трудности при выборе их параметров, если требуется обеспечить заданные выходные характеристики датчиков. Попытки собрать и обобщить полученные результаты исследований этих датчиков [1, 2, 3] сопровождались заметными трудностями из-за рассеивания и даже противоречивости данных, полученных различными авторами. Пока не удалось составить и достаточно точную расчетную модель датчика с конической кольцевой струей. Все эти трудности объясняются существенными нелинейностями и резонансными явлениями в аэродинамических процессах, происходящих в рециркуляционной зоне датчика при приближении объекта [4, 5].

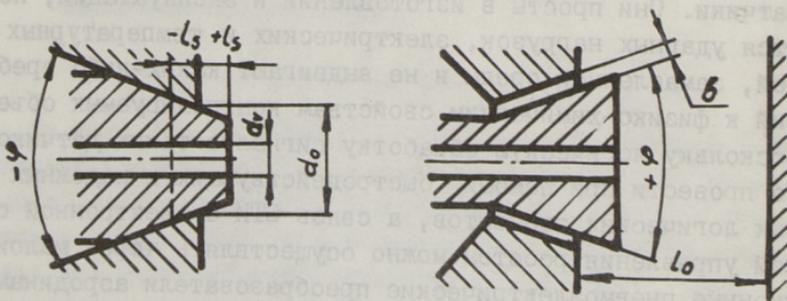


Рис. 1. Схемы датчиков.

Потребность в датчиках в заданными выходными характеристиками и успехи в управлении аэродинамическими явлениями в рециркуляционной зоне датчика вдохновили сделать еще одну попытку составления банка данных для разработки датчиков на базе конической кольцевой струи. Банк данных был составлен так, чтобы перекрыть самый распространенный диапазон основных параметров датчиков. Так, диапазон начальных диаметров  $d_0$  струи (см. рис. 1) был выбран от 5 до 16 мм, а угол конуса струи  $\varphi$  от  $+50^\circ$  до  $-90^\circ$ . Остальные параметры датчика изменялись в пределах, обеспечивающих еще их приемлемые выходные характеристики. В банк данных были включены все параметры как релейных, так и аналоговых выходных характеристик датчика, а также его рециркуляционной зоны. Анализ банка данных позволил выяснить самые рациональные пути управления режимами работы и выходными параметрами датчика, что привело к заметному сокращению объема экспериментальных работ при разработке новых датчиков с требуемыми выходными характеристиками.

Подробный анализ аэродинамических явлений как в датчиках с расширяющейся, так и с фокусированной кольцевой струями в достаточной мере отражены в работах [4] и [5]. Остановимся здесь только на проблемах, которые нужно иметь в виду при выборе параметров датчиков для РТК. В СТИ РТК штамповки, механообработки и сборки датчики, как правило, должны выдавать дискретную информацию о наличии и точности расположения объектов работы, рабочих органов технологического оборудования и периферийных устройств. Поэтому в дальнейшем основное внимание уделено достижению дискретного режима работы датчиков. Следует также отметить, что при расстояниях работы датчика свыше 3 мм дискретный режим обеспечивает более высокую точность [2].

#### Рекомендации по обеспечению дискретного режима работы датчика

Анализ банка данных показывает, что релейного режима работы можно добиться во всем рассматриваемом диапазоне параметров датчиков с расходящейся, цилиндрической и фокусированной кольцевыми струями. При выходе из сопла кольцевая расходящаяся и цилиндрическая струи из-за всасывания в струю воздуха сливаются в одну общую струю, замыкая тем ре-

циркуляционную зону датчика с вакуумом внутри ее и в выходном канале. При фокусированной струе слияние обеспечено уже геометрией струи, но в зависимости от угла соударения внутри рециркуляционной зоны может возникать и избыточное давление. При приближении к датчику объекта его рециркуляционная зона начинает деформироваться и увеличивается обратное течение в рециркуляционную зону из зоны соударения, что, в свою очередь, уменьшает вакуум в ней.

Дальнейшие события зависят от устойчивости рециркуляционной зоны. Если устойчивость рециркуляционной зоны мала, то ее распад растягивается на значительное расстояние и на выходе датчика наблюдается близкий к аналоговому сигнал с меньшими или большими флуктуациями. При высокой устойчивости зоны при приближении объекта может найтись положение, где силы, действующие против тех сил, которые стараются сохранить рециркуляционную зону, превосходят последние, и рециркуляционная зона открывается. Поскольку в этом случае переход к новой форме течения перемещается в сторону больших внедрений, то новая форма течений также может быть устойчивой и будет наблюдаться релейный характер выходной характеристики с гистерезисом. При средней устойчивости распад рециркуляционной зоны, как правило, сопровождается столь сильными флуктуациями выходного сигнала, что такой датчик оказывается непригодным.

Хотя устойчивость рециркуляционной зоны датчика определяется его основными геометрическими параметрами  $d_0, \varphi$  и  $b$  (см. рис. 1) и давлением питания  $p_0$ , самым важным параметром здесь является выдвижение-углубление сердечника  $\pm l_s$ . При помощи длины сердечника можно регулировать баланс воздуха, всасываемого в струю из наружной и внутренней поверхности рециркуляционной зоны, что вызывает соответственно уменьшение или увеличение вакуума в нем и, следовательно, изменение ее устойчивости. Эффективность такого управления режимами работы датчика видна на рис. 2. Только при фокусированной струе правила регулировки режима работы более сложные, поскольку имеется больше чем одна область аналогового и дискретного режимов работы датчика.

При разработке нового датчика с заданными параметрами релейного выходного сигнала придется, как правило, ис-

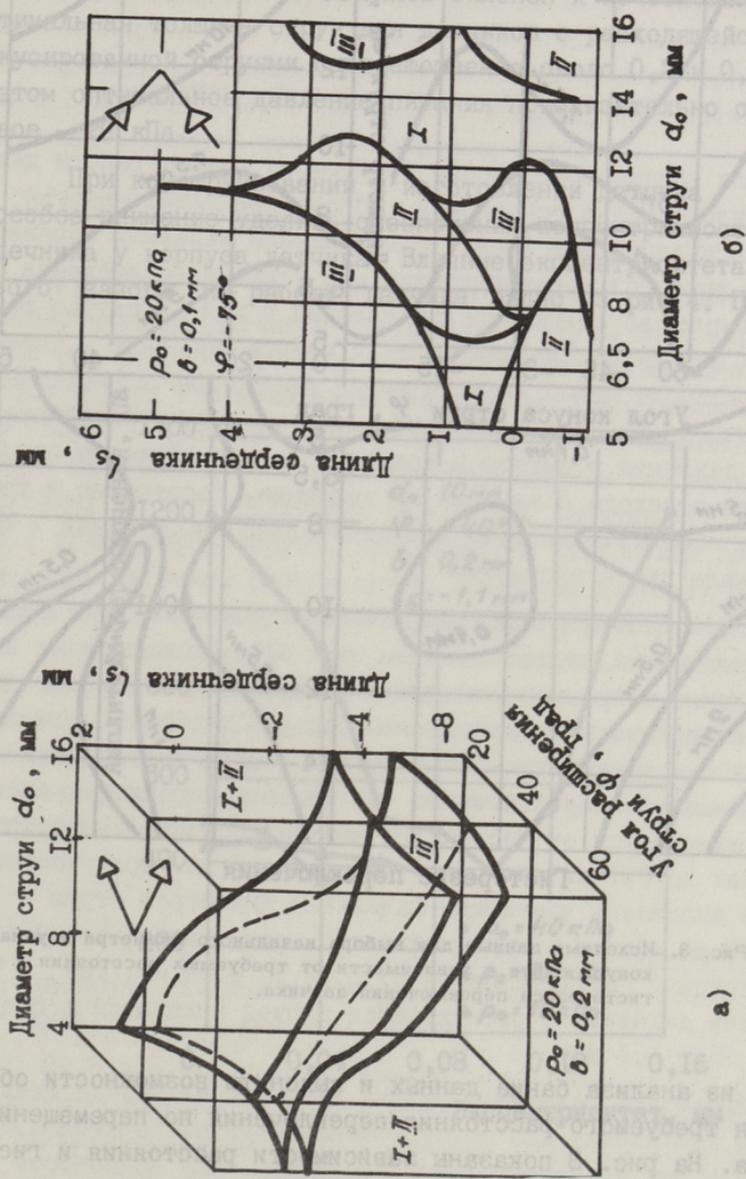
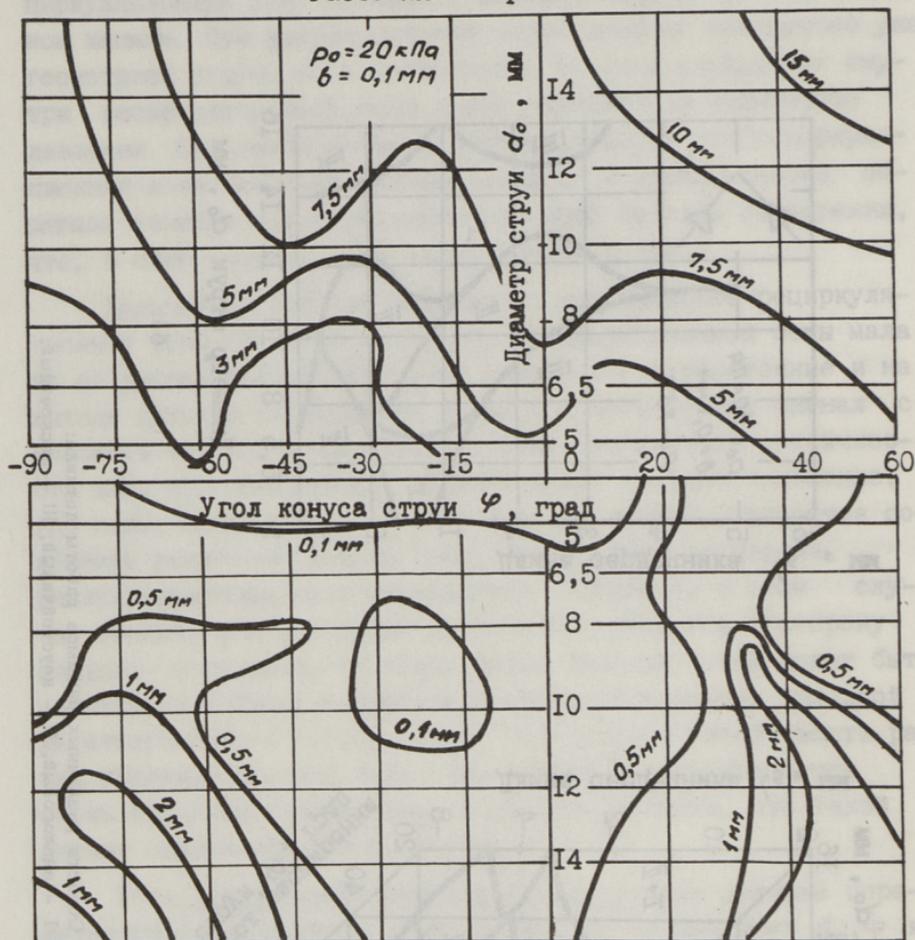


Рис. 2. Области различных режимов работы датчика:  
I - аналоговый, II - неустойчивый, III - дискретный.

### Расстояние переключения



### Гистерезис переключения

Рис. 3. Исходные данные для выбора начального диаметра и угла конуса струи в зависимости от требуемых расстояния и гистерезиса переключения датчика.

ходить из анализа банка данных и выяснить возможности обеспечения требуемого расстояния переключения по перемещению объекта. На рис. 3 показаны зависимости расстояния и гистерезиса переключения от начального диаметра и угла конуса струи, составленные для одной возможной комбинации давления питания и толщины струи. Как видно из характера изменения гистерезиса переключения, более подходящими для дискретного режима работы датчиков являются углы конуса струи  $\varphi$  от

+30 до +50° и от -50 до -80°. При малой толщине струи и давлении питания релейный выходной сигнал у датчика обычно отсутствует и появляется при увеличении их на оптимальный уровень, после чего опять склонен к исчезновению. Оптимальная толщина струи для датчиков с расходящейся и фокусированной струями соответственно около 0,2 и 0,1 мм. При этом оптимальное давление питания приблизительно одинаковое - 20 кПа.

При конструировании и изготовлении датчика следует особое внимание уделить обеспечению concentричности сердечника у корпуса датчика. Влияние эксцентриситета кольцевого зазора на работу датчика видно из рис.4. При увели-

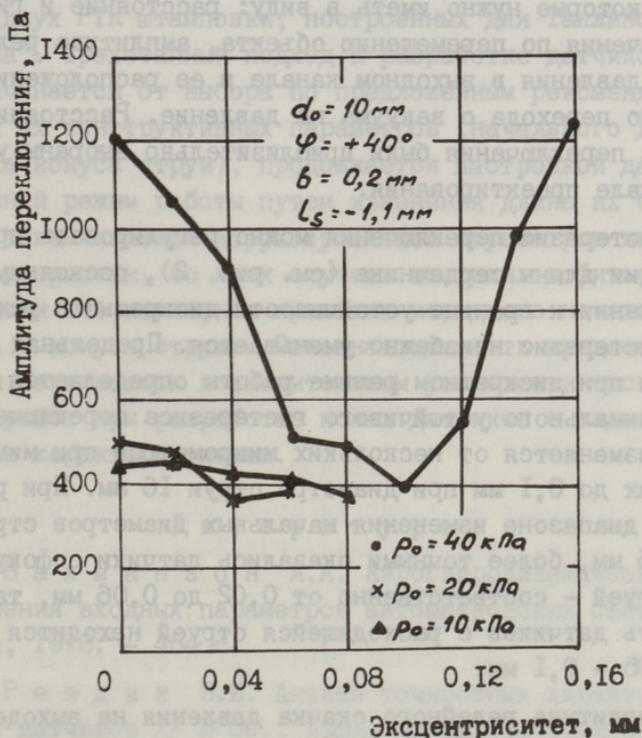


Рис. 4. Влияние эксцентриситета кольцевого зазора на выходные характеристики датчика.

чении эксцентриситета релейный режим, как правило, ослабевает и только при очень сильных струях возобновляется, что и нашло применение в датчиках большого расстояния [1].

### Как регулировать выходные параметры датчика

Если задача обеспечения требуемого режима работы датчика заключается в основном в управлении устойчивостью его рециркуляционной зоны, то достижение желаемых параметров его выходной характеристики – в усилении–ослаблении определенных аэродинамических явлений в ней. В случае релейного выходного сигнала имеется четыре основных параметра, которые нужно иметь в виду: расстояние и гистерезис переключения по перемещению объекта, амплитуда релейного скачка давления в выходном канале и ее расположение относительно перехода с вакуума на давление. Расстояние и гистерезис переключения были приблизительно выбраны уже в самом начале проектирования.

Гистерезис переключения можно регулировать при помощи коррекции длины сердечника (см. рис. 2), поскольку при приближении к границе устойчивости дискретного режима работы гистерезис неизбежно уменьшается. Предельная точность датчика при дискретном режиме работы определяется величиной минимального устойчивого гистерезиса переключения, которая изменяется от нескольких микрометров при миниатюрных датчиках до 0,1 мм при диаметре струи 16 мм. При рассмотренном диапазоне изменения начальных диаметров струи – от 5 до 16 мм, более точными оказались датчики с фокусированной струей – соответственно от 0,02 до 0,06 мм, так как точность датчиков с расходящейся струей находится в пределах 0,05 – 0,1 мм.

Амплитуда релейного скачка давления на выходе датчика обычно достаточна для переключения струйных пороговых элементов и без предварительного усиления. При надобности можно переместить расположение скачка относительно перехода с вакуума на давление путем изменения конструкции приемного сопла [4]. Для изменения величины амплитуды скачка давления на выходе датчика следует изменять толщину струи и

давление питания в пределах сохранения режима работы датчика. Надо учесть, что при изменении толщины струи от 0,05 до 0,3 мм, расстояние переключения увеличивается у датчиков с расходящейся струей примерно на 35 % и при фокусированной струе на 50 %. Прибавление давления питания I клапана увеличивает расстояние переключения датчика приблизительно на 0,1 мм. Увеличение расстояния переключения датчика можно компенсировать осевым смещением датчика.

### Выводы и рекомендации

Предложенная методика выбора параметров и настройки пневматических датчиков с кольцевой струей была апробирована при разработке системы очувствления промышленных роботов в двух РТК штамповки, построенных для Таллинского ПО "Норма". Трехэтапный подход к разработке датчиков, который начинается от выбора по предложенным рекомендациям основных их конструктивных параметров (начального диаметра и угла конуса струи), продолжается настройкой датчиков на заданный режим работы путем изменения длины их сердечников и заканчивается корригированием параметров их выходных характеристик, во всех случаях позволил добиться намеченной цели без изменения принятых исходного начального диаметра и конуса струи. Основная ценность предложенной методики заключается в значительном уменьшении экспериментальных работ при разработке новых датчиков с заданными выходными характеристиками.

### Л и т е р а т у р а

1. З а л м а н з о н Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. - М: Наука, 1973. - 464 с.
2. Р е э д и к В.И. Анализ точностных характеристик струйных датчиков // В сб.: Ausgewählte Vorträge VII Jablona Fluidik Konferenz, B7. - Dresden, DDR, 1978. - 10 S.
3. Т ö p f e r Н., S c h w a r z А., L e u t h o l d О. Überblick-Stand-Trend der Fluid-Technik in der Automatisierung // Messen, Steuern, Regeln. - 1978. - N 11. - S. 610-616.

4. Р е э д и к В.И. Пути обеспечения различных режимов работы пневматических датчиков положения с конической расширяющейся струей // В кн.: Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. Вып. 10. - М.: Машиностроение, 19. - 1984. - С. 186-192.

5. Р е э д и к В.И. Исследование возможностей регулирования режима работы пневматических датчиков положения с кольцевой фокусированной струей // В сб.: Гидроаэродинамика и динамика систем управления. Гидравлика и пневматика. Вып. I // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1983. - № 553. - С. 51-62.

V. Reedik

The Annular Jet Proximity Sensors for Sensing in the Robot-Technical Systems

Abstract

The specific features of using pneumatic annular jet proximity sensors in robot-aided systems are analysed. The best suitability of sensors with discrete working character in this case is pointed out. The thoroughgoing recommendations for the choice of the sensor main parameters to get the discrete working regime for sensors with focussed and diverging annular jets are given.

ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ  
В НАПОРНЫХ ТРУБАХ

## Введение

Решение задачи о неустановившемся течении несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе сводится к интегрированию уравнений теплопроводности, которое легко осуществляется классическими методами математической физики [1-3].

Поскольку рассматриваемая задача позволяет выяснить сущность гидромеханических процессов и является простой модельной задачей, интерес к ней не ослабевает. В работах [4-12] рассмотрены методы приведения соответствующей двумерной задачи к одномерной для определения средней скорости движения, а также применение асимптотических методов для получения решений задачи.

В настоящей работе подробно рассматривается вопрос о выводе уравнения для средней скорости движения с применением преобразования Лапласа совместно с асимптотическими методами. Даются соответствующие дифференциальные уравнения в явном виде, применяемые при больших временах. Указывается, что применяемый метод систематизирует и обобщает ранее полученные результаты по проблеме приведения уравнения нестационарного течения жидкости в цилиндрической трубе [5, 9, 11]. Далее рассматривается задача об импульсных течениях несжимаемой жидкости в трубе. В случае некоторых основных импульсных процессов исследуются изменения скоростей и расходов жидкости. Вводится так называемый интегральный коэффициент сопротивления трения для конечных импульсных процессов и выясняется его взаимосвязь с коэффициентом сопротивления трения стационарного движения в трубе.

# I. Уравнение нестационарного течения несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе

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

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

где  $v$  - локальная скорость в направлении оси трубы;  
 $x, r$  - координаты в направлении оси и радиуса трубы;  
 $t$  - время;  
 $p$  - давление;  
 $\mu$  - коэффициент динамической вязкости;  
 $\rho$  - плотность жидкости.

При интегрировании уравнения (I.1) по сечению трубы имеем

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{2}{R} \tau_0 = - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (I.2)$$

где  $V$  - средняя по сечению скорость;

$$V = \frac{2}{R^2} \int_0^R v r dr, \quad (I.3)$$

$\tau_0$  - касательное напряжение на стене трубы

$$\tau_0 = -\mu \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)_{r=R}; \quad (I.4)$$

$R$  - радиус трубы.

Введем безразмерные величины по формулам

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{r}{R}; & \tau &= \frac{\gamma t}{R^2}; & u &= \frac{v}{W}; \\ U &= \frac{V}{W}; & \kappa_0 &= \frac{R}{\mu W} \tau_0; & q &= - \frac{R^2}{\nu \rho W} \frac{\partial p}{\partial x}, \end{aligned} \quad (I.5)$$

где  $\nu$  - коэффициент кинетической вязкости;

$W$  - нормирующая скорость.

В безразмерных переменных уравнения (I.1), (I.2) и соотношения (I.3), (I.4) получают вид:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} - \left( \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) = q(\tau), \quad (I.6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + 2\kappa_0 = q(\tau), \quad (I.7)$$

$$U = 2 \int_0^1 u \eta d\eta, \quad (I.8)$$

$$\kappa_0 = - \left( \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)_{\eta=1}. \quad (I.9)$$

Раньше чем приступить к интегрированию уравнения (I.6) или (I.7), (I.8) рассмотрим коэффициенты трения.

Определяем коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  из зависимости

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\lambda \rho V^2}{4R} \quad (\text{I.10})$$

и коэффициент местного поверхностного трения  $\zeta$  из зависимости

$$\tau_0 = \frac{\zeta \rho V^2}{8}. \quad (\text{I.11})$$

Соответствующие соотношения в безразмерных величинах имеют вид

$$q = \frac{1}{8} \lambda R_e U^2, \quad (\text{I.12})$$

$$\kappa_0 = \frac{1}{16} \zeta R_e U^2, \quad (\text{I.13})$$

где

$$R_e = \frac{2WR}{\nu}. \quad (\text{I.14})$$

Найдем решение уравнения (I.6) при граничном условии

$$u = 0 \quad \text{при} \quad \eta = 1 \quad (\text{I.15})$$

и начальном условии

$$u = 0 \quad \text{при} \quad \tau = 0. \quad (\text{I.16})$$

При начальном условии (I.16) преобразованием Лапласа уравнение (I.6) примет вид

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \eta} - s \bar{u} = -\bar{q}(s). \quad (\text{I.17})$$

Решением уравнения (I.17) при граничном условии (I.15) является

$$\bar{u} = \frac{I_0(\sqrt{s}) - I_0(\eta\sqrt{s})}{s I_0(\sqrt{s})} \cdot \bar{q}(s), \quad (\text{I.18})$$

где  $I_0$  - функция Бесселя от мнимого аргумента.

Соответственно, интегрируя по формуле (I.8), имеем

$$\bar{u} = \frac{I_0(\sqrt{s}) - \frac{2}{\sqrt{s}} I_1(\sqrt{s})}{s I_0(\sqrt{s})} \cdot \bar{q}(s). \quad (\text{I.19})$$

Учитывая, что

$$I_0(\sqrt{s}) - \frac{2}{\sqrt{s}} I_1(\sqrt{s}) = I_2(\sqrt{s}) \quad (\text{I.20})$$

соотношение (I.18) примет вид

$$\bar{u} = \frac{I_2(\sqrt{s})}{s I_0(\sqrt{s})} \bar{q}(s). \quad (\text{I.21})$$

Если ввести обозначения

$$\bar{K}(\eta, s) = \frac{I_0 \sqrt{s} - I_0(\eta \sqrt{s})}{s I_0(\sqrt{s})}, \quad (I.22)$$

$$\bar{L}(s) = \frac{I_2(\sqrt{s})}{s I_0(\sqrt{s})}, \quad (I.23)$$

то соотношения (I.18), (I.21) примут вид:

$$\bar{u} = \bar{K}(\eta, s) \cdot \bar{q}(s), \quad (I.24)$$

$$\bar{U} = \bar{L}(s) \cdot \bar{q}(s). \quad (I.25)$$

При этом

$$\bar{L}(s) = 2 \int_0^1 \bar{K}(\eta, s) \eta d\eta. \quad (I.26)$$

Изображениям (I.24), (I.25) соответствуют оригиналы

$$\bar{K}(\eta, \tau) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_k \eta)}{\alpha_k J_1(\alpha_k)} e^{-\alpha_k^2 \tau}, \quad (I.27)$$

$$L(\tau) = 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_k^2} e^{-\alpha_k^2 \tau}. \quad (I.28)$$

Здесь  $\alpha_k$  - нули функции Бесселя  $J_0(\alpha)$ .

В итоге, скорость и средняя скорость движения жидкости по соотношениям (I.24) - (I.28) представимы в виде:

$$u(\eta, \tau) = \int_0^{\tau} K(\eta, \tau') q(\tau - \tau') d\tau', \quad (I.29)$$

$$U(\tau) = \int_0^{\tau} L(\tau') q(\tau - \tau') d\tau'. \quad (I.30)$$

## 2. Касательные напряжения на стенке трубы и приведенное уравнение

При выводе уравнения средней скорости основной проблемой являются выражения касательных напряжений на стенке трубы через эту скорость. Соответствующее выражение хорошо известно [6, 9, 10]. Из соотношения (I.7) имеем

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{2} (\bar{q}(s) - s \bar{U}). \quad (2.1)$$

Исключая  $\bar{q}(s)$  при помощи соотношения (I.21), получим

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{I_0(\sqrt{s})}{I_2(\sqrt{s})} - 1 \right) s \bar{U}, \quad (2.2)$$

или, учитывая соотношение (I.20),

$$\bar{x}_0 = \frac{I_1(\sqrt{s})}{\sqrt{s} I_2(\sqrt{s})} s \bar{U}. \quad (2.3)$$

Введем обозначение

$$\bar{M}(s) = \frac{2 I_1 \sqrt{s}}{\sqrt{s} \cdot I_2(\sqrt{s})}. \quad (2.4)$$

Теперь

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{2} \bar{M}(s) s \bar{U}. \quad (2.5)$$

Для оригинала из последнего соотношения имеем

$$x_0(\tau) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau} M(\tau - \tau') \frac{dU}{d\tau'} d\tau'. \quad (2.6)$$

где

$$M(\tau) = 8 + 4 \sum_{\kappa=1}^{\infty} e^{-\gamma_{\kappa}^2 \tau}. \quad (2.7)$$

Здесь  $\gamma_{\kappa}$  — нули функции Бесселя  $J_2(\alpha)$ .

Подставляя касательные напряжения на стенке (2.6) в уравнение (1.7), получаем исходное уравнение для средней скорости в известной форме

$$\frac{dU}{d\tau} + \int_0^{\tau} M(\tau - \tau') \frac{dU}{d\tau'} d\tau' = q(\tau). \quad (2.8)$$

### 3. Решение при малых временах

Для получения приближенного решения рассматриваемой задачи при малых значениях времени  $\tau$  можно использовать свойство преобразования Лапласа, по которому поведение оригинала при  $\tau \rightarrow 0$  определяется поведением изображения при  $s \rightarrow \infty$ .

Так как при  $z \rightarrow \infty$  имеет место асимптотическое разложение функции Бесселя от мнимого аргумента в виде

$$I_n(z) \approx \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}} \left[ 1 - \frac{4n^2 - 1}{8z} + \frac{(4n^2 - 1)(4n^2 - 9)}{2!(8z)^2} - \frac{(4n^2 - 1)(4n^2 - 9)(4n^2 - 25)}{3!(8z)^3} + \dots \right], \quad (3.1)$$

то для изображений  $\bar{K}(\eta, s)$ ,  $\bar{L}(s)$ ,  $\bar{M}(s)$  по соотношениям (1.22), (1.23), (2.4) и (3.1) получаем при  $s \rightarrow \infty$  асимптотические разложения

$$\bar{K}(\eta, s) \approx \frac{1}{s} \left[ 1 - \frac{e^{-\sqrt{s}(1-\eta)}}{\sqrt{\eta}} \left( 1 + \frac{1-\eta}{8\eta} \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} + \frac{9(1-\eta^2) - 2\eta(1-\eta)}{128\eta^2} \frac{1}{s} + \dots \right) \right] \quad (3.2)$$

при  $\eta = 0$

$$\bar{L}(s) = \frac{1}{s} - \frac{2}{s^{3/2}} + \frac{1}{s^2} + \dots, \quad (3.3)$$

$$\bar{M}(s) = \frac{2}{\sqrt{s}} + \frac{3}{s} + \frac{15}{4s^{3/2}} + \dots \quad (3.4)$$

Соответствующие оригиналы имеют вид:

$$K(\eta, \tau) = 1 + \frac{1-10\eta+\eta^2}{8\sqrt{\eta}} \operatorname{erfc} \frac{1-\eta}{2\sqrt{\tau}} - \frac{1-\eta}{4\eta^{3/2}} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} e^{-\frac{(1-\eta)^2}{4\tau}} + \dots, \quad (3.5)$$

$$L(\tau) = 1 - 4\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} + \tau + \dots, \quad (3.6)$$

$$M(\tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi\tau}} + 3 + \frac{15}{2} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} + \dots \quad (3.7)$$

Из выражений (2.6) и (3.7) в первом приближении для касательных напряжений на стенке трубы получим формулу

$$\varkappa_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau-\tau'}} \frac{dU}{d\tau'} d\tau', \quad (3.8)$$

или

$$\varkappa_0(\tau) = 2\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \left[ \left( \frac{dU}{d\tau} \right)_{\tau=0} + \frac{2}{3} \tau \left( \frac{d^2U}{d\tau^2} \right)_{\tau=0} + \frac{4}{15} \tau^2 \left( \frac{d^3U}{d\tau^3} \right)_{\tau=0} + \dots \right]. \quad (3.9)$$

Отметим, что формула (3.8) представлена в работе [9].

#### 4. Решение при больших временах

В работах [6, 7, 9, 10] при выводе приближенного решения при больших временах пользуются несколькими первыми членами в рядах (1.28), (2.7) для функций  $L(\tau)$  и  $M(\tau)$ . Ниже для получения приближенного решения используется свойство преобразования Лапласа, по которому поведение оригинала при  $\tau \rightarrow \infty$  определяется поведением изображения при  $s \rightarrow 0$ .

Функции Бесселя от мнимого аргумента имеют следующее разложение в степенной ряд:

$$I_n(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z^2}{4}\right)^k}{k! \Gamma(n+k+1)}. \quad (4.1)$$

Если использовать это разложение при приближенном вычислении функции (I.22), то будем иметь

$$\bar{K}(\eta, s) = \frac{1}{s} \left( 1 - \frac{1 + \frac{s\eta^2}{4} + \frac{s^2\eta^4}{64} + \frac{s^3\eta^6}{36 \cdot 64} + \dots}{1 + \frac{s}{4} + \frac{s^2}{64} + \frac{s^3}{36 \cdot 64} + \dots} \right), \quad (4.2)$$

или

$$\begin{aligned} \bar{K}(\eta, s) = & \frac{1}{4} (1 - \eta^2) + \left[ \frac{1}{64} (1 - \eta^4) - \frac{1}{16} (1 - \eta^2) \right] s + \\ & + \left[ \frac{1}{2304} (1 - \eta^6) - \frac{1}{256} (1 - \eta^4) + \frac{3}{256} (1 - \eta^2) \right] s^2 + \dots \end{aligned} \quad (4.3)$$

Аналогично для функции (I.23) и (2.4) получаются разложения

$$\bar{L}(s) = \frac{1}{8} \left( 1 - \frac{1}{6} s + \frac{11}{384} s^2 + \dots \right), \quad (4.4)$$

$$\bar{M}(s) = \frac{8}{s} + \frac{1}{3} - \frac{1}{144} s + \frac{1}{4320} s^2 + \dots \quad (4.5)$$

Подставляя эти разложения в соотношения (I.24), (I.25), (2.5) и переходя к соответствующим равенствам в оригиналах, получим

$$\begin{aligned} u(\eta, \tau) = & \frac{1}{4} (1 - \eta^2) q + \left[ \frac{1}{64} (1 - \eta^4) - \frac{1}{16} (1 - \eta^2) \right] \frac{dq}{d\tau} + \\ & + \left[ \frac{1}{2304} (1 - \eta^6) - \frac{1}{256} (1 - \eta^4) + \frac{3}{256} (1 - \eta^2) \right] \frac{d^2 q}{d\tau^2} + \dots, \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$U(\tau) = \frac{1}{8} q - \frac{1}{48} \frac{dq}{d\tau} + \frac{11}{3072} \frac{d^2 q}{d\tau^2} + \dots, \quad (4.7)$$

$$\varkappa_0(\tau) = 4U + \frac{1}{6} \frac{dU}{d\tau} - \frac{1}{288} \frac{d^2 U}{d\tau^2} + \frac{1}{384} \frac{d^3 U}{d\tau^3} + \dots \quad (4.8)$$

При помощи выражения (4.8) для касательных напряжений уравнение (I.7) можно представить в виде

$$8U + \frac{4}{3} \frac{dU}{d\tau} - \frac{1}{144} \frac{d^2 U}{d\tau^2} + \frac{1}{4320} \frac{d^3 U}{d\tau^3} + \dots = q(\tau). \quad (4.9)$$

Интересно отметить, что уравнение (4.9) для определения средней скорости в таком же виде получено в работе [9], используя при приведении разложение по степеням координаты  $\eta$ .

Но из работы [9] не вытекает асимптотический характер полученного уравнения, который свойственен уравнению (4.9).

## 5. Расход при конечных импульсах

Рассмотрим движение жидкости в цилиндрической трубе под влиянием конечных импульсов давления. Обозначим

$$\int_0^{\infty} q(\tau) d\tau = q^* \quad (5.1)$$

и назовем импульсы давления конечными, если  $q^*$  является конечным числом.

Интегрируя уравнение (I.6) и соотношение (I.8) по времени и учитывая, что

$$u(\eta, 0) = 0, \quad u(\eta, \infty) = 0, \quad (5.2)$$

получим

$$\frac{\partial^2 u^*}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial u^*}{\partial \eta} = q^*, \quad (5.3)$$

$$U^* = 2 \int_0^1 u^* \eta d\eta, \quad (5.4)$$

где

$$u^*(\eta) = \int_0^{\infty} u(\eta, \tau) d\tau, \quad (5.5)$$

$$U^* = \int_0^{\infty} U(\tau) d\tau. \quad (5.6)$$

Величинами  $u^*(\eta)$  и  $U^*$  определяются суммарные расходы, обусловленные от импульса давления  $q^*$  в точке и в сечении трубы в целом.

Видно, что уравнение (5.3) для определения суммарного расхода совпадает с уравнением стационарного движения. Поэтому, если определить теперь интегральные коэффициенты гидравлического трения  $\lambda^*$  и местного поверхностного трения  $\xi^*$  аналогично формулам (I.12), (I.13) из зависимостей

$$q^* = \frac{1}{8} \lambda^* R_e U^{*2}, \quad (5.7)$$

$$\alpha_0^* = \frac{1}{16} \xi^* R_e U^{*2}, \quad (5.8)$$

получим полную аналогию со случаем стационарного движения.

Из уравнений (I.7), (5.3) и соотношения (5.4) следует, что

$$\lambda^* = \xi^*, \quad (5.9)$$

причем

$$\lambda^* = \frac{64}{R_e^*}, \quad (5.10)$$

где

$$R_e^* = R_e U^*. \quad (5.11)$$

Итак, использование суммарных расходов нестационарного ламинарного движения в цилиндрической трубе под влиянием конечных импульсов давления можно рассматривать аналогично стационарному движению.

## 6. Некоторые простые импульсные процессы

Рассмотрим теперь некоторые простые конкретные импульсы давления.

### 1. Пусть

$$q(\tau) = \delta(\tau), \quad (6.1)$$

где  $\delta(\tau)$  - функция Дирака.

Из формул (I.27)-(I.30) получим

$$u_\delta(\eta, \tau) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_0(\eta \alpha_k)}{\alpha_k J_1(\alpha_k)} e^{-\alpha_k^2 \tau}, \quad (6.2)$$

$$U_\delta(\tau) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_k^2 \tau}}{\alpha_k^2}. \quad (6.3)$$

### 2. Пусть

$$q(\tau) = H(\tau) - H(\tau-1), \quad (6.4)$$

где  $H(\tau)$  - единичная функция Хевисайда.

Тогда формулы (I.27) - (I.30) дадут

$$u_H(\eta, \tau) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_0(\eta \alpha_k)}{\alpha_k J_1(\alpha_k)} \left[ (1 - e^{-\alpha_k^2 \tau}) H(\tau) - (1 - e^{-\alpha_k^2 (\tau-1)}) H(\tau-1) \right], \quad (6.5)$$

$$U_n(\tau) = 4 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_{\kappa}^4} \left[ (1 - e^{-\alpha_{\kappa}^2 \tau}) H(\tau) - (1 - e^{-\alpha_{\kappa}^2 (\tau-1)}) H(\tau-1) \right]. \quad (6.6)$$

3. Пусть

$$q_{\kappa}(\tau) = \frac{\tau}{\alpha} H(\tau) - \frac{\tau}{\alpha} H(\tau-\alpha) + \frac{\tau-2}{\alpha-2} H(\tau-\alpha) - \frac{\tau-2}{\alpha-2} H(\tau-2), \quad (6.7)$$

тогда по формулам (I.27) - (I.30) будем иметь

$$u_{\alpha}(\eta, \tau) = 2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{J_0(\eta \alpha_{\kappa})}{\alpha_{\kappa}^5 J_1(\alpha_{\kappa})} \left[ \frac{1}{\alpha} \bar{u}(\tau) H(\tau) - \frac{2\bar{u}(\tau-\alpha)}{\alpha(2-\alpha)} H(\tau-\alpha) + \frac{\bar{u}(\tau-2)}{2-\alpha} H(\tau-2) \right], \quad (6.8)$$

$$U_{\alpha}(\tau) = 4 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_{\kappa}^6} \left[ \frac{\bar{u}(\tau)}{\alpha} H(\tau) - \frac{2\bar{u}(\tau-\alpha)}{\alpha(2-\alpha)} H(\tau-\alpha) + \frac{\bar{u}(\tau-2)}{2-\alpha} H(\tau-2) \right], \quad (6.9)$$

$$\bar{u}(\tau) = e^{-\alpha_{\kappa}^2 \tau} + \alpha_{\kappa}^2 \tau - 1.$$

Разные формулы импульса получим, если дадим для  $\alpha$  значение в интервале  $0 \leq \alpha \leq 2$ .

Выпишем формулы средней скорости для некоторых конкретных значений  $\alpha$ :

при  $\alpha = 1$

$$U_1(\tau) = 4 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_{\kappa}^6} \left[ \bar{u}(\tau) H(\tau) - 2\bar{u}(\tau-1) H(\tau-1) + \bar{u}(\tau-2) H(\tau-2) \right], \quad (6.10)$$

при  $\alpha = 0$

$$U_0(\tau) = 4 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_{\kappa}^6} \left[ (\alpha_{\kappa}^2 (1 - e^{-\alpha_{\kappa}^2 \tau}) - \frac{1}{2} \bar{u}(\tau)) H(\tau) + \frac{1}{2} \bar{u}(\tau-2) H(\tau-2) \right], \quad (6.11)$$

при  $\alpha = 2$

$$U_2(\tau) = 4 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_{\kappa}^6} \left[ \frac{1}{2} \bar{u}(\tau) H(\tau) - (\alpha_{\kappa}^2 (1 - e^{-\alpha_{\kappa}^2 (\tau-2)}) + \frac{1}{2} \bar{u}(\tau-2)) H(\tau-2) \right], \quad (6.12)$$

при  $\alpha = 1/2$

$$U_{\frac{1}{2}}(\tau) = 4 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_{\kappa}^6} \left[ 2\bar{u}(\tau) H(\tau) - \frac{8}{3} \bar{u}(\tau - \frac{1}{2}) H(\tau - \frac{1}{2}) + \frac{2}{3} \bar{u}(\tau-2) H(\tau-2) \right]. \quad (6.13)$$

С помощью формул (I.30), (3.6) получим следующие асимптотические формулы для вычисления средней скорости при малых временах:

$$U_0(\tau) \approx \frac{1}{2} - 2\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} + \frac{\tau}{2} + \dots, \quad (6.14)$$

$$U_n(\tau) \approx \bar{u}_n(\tau)H(\tau) - \bar{u}_n(\tau-1)H(\tau-1), \quad (6.15)$$

где  $\bar{u}_n(\tau) = \tau - \frac{8}{3\sqrt{\pi}}\sqrt{\tau^3} + \frac{1}{2}\tau^2 + \dots,$

$$U_1(\tau) \approx \bar{u}_1(\tau)H(\tau) - 2\bar{u}_1(\tau-1)H(\tau-1) + \bar{u}_1(\tau-2)H(\tau-2), \quad (6.16)$$

где  $\bar{u}_1(\tau) \approx \frac{\tau^2}{2} - \frac{16}{15\sqrt{\pi}}\sqrt{\tau^5} + \frac{1}{6}\tau^3 + \dots,$

$$U_0(\tau) \approx \left(\tau - \frac{8}{3\sqrt{\pi}}\sqrt{\tau^3} + \frac{1}{4}\tau^2 + \frac{2}{3\sqrt{\pi}}\sqrt{\tau^5} + \dots\right)H(\tau) + \left(\frac{1}{4}(\tau-2)^2 - \frac{8}{15\sqrt{\pi}}\sqrt{(\tau-2)^5} + \dots\right)H(\tau-2), \quad (6.18)$$

$$U_2(\tau) \approx \left(\frac{1}{4}\tau^2 - \frac{8}{15\sqrt{\pi}}\sqrt{\tau^5} + \dots\right)H(\tau) + \left(-(\tau-2) + \frac{8}{3\sqrt{\pi}}\sqrt{(\tau-2)^3} - \frac{3}{4}(\tau-2)^2 + \dots\right)H(\tau-2), \quad (6.19)$$

$$U_{1/2}(\tau) \approx \left(\tau^2 - \frac{32}{15\sqrt{\pi}}\sqrt{\tau^5} + \frac{1}{3}\tau^3 + \dots\right)H(\tau) - \left(\frac{4}{3}\left(\tau - \frac{1}{2}\right)^2 - \frac{128}{45\sqrt{\pi}}\sqrt{\left(\tau - \frac{1}{2}\right)^5} + \dots\right)H\left(\tau - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{3}(\tau-2)^2 - \frac{32}{45\sqrt{\pi}}\sqrt{(\tau-2)^5} + \dots\right)H(\tau-2). \quad (6.20)$$

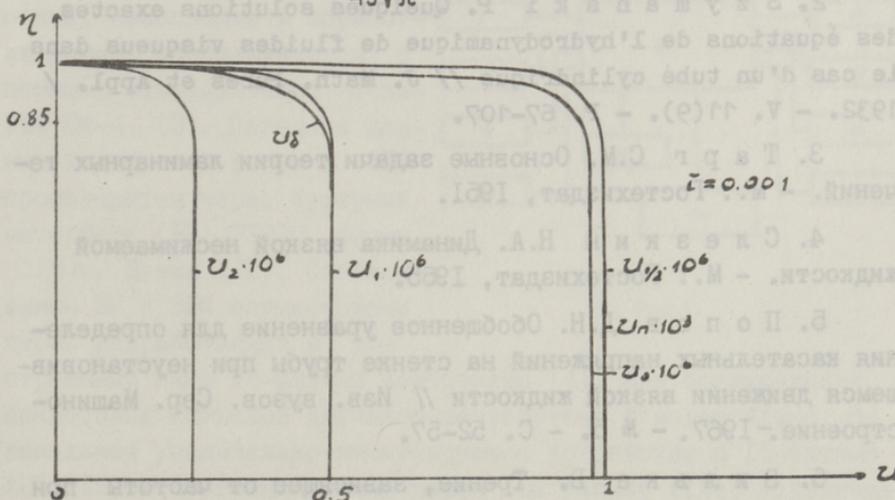


Рис. 1.

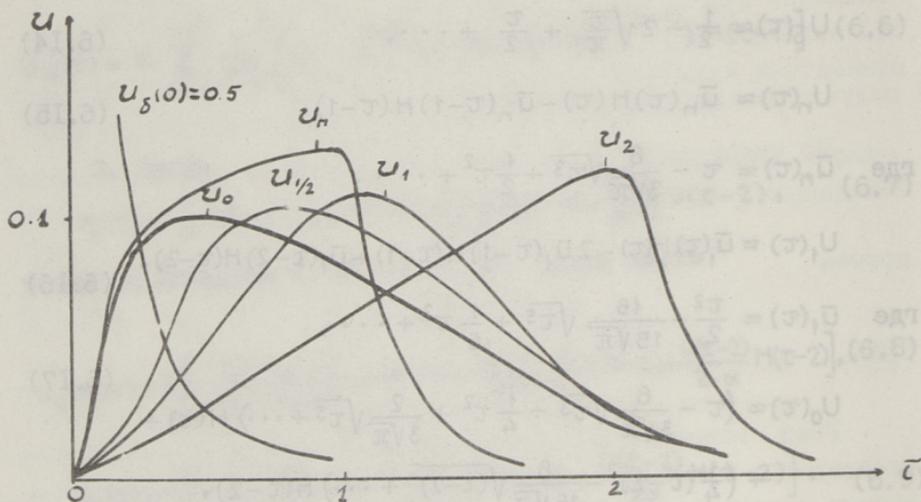


Рис. 2.

Численные результаты получены из формул (6.3), (6.6), (6.10) - (6.20), а также из соответствующих формул для скоростей  $u(\eta, \tau)$  и представлены на рисунках 1 и 2.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г р о м е к а И.С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубах // Учен. зап. Казанск. ун-та. - 1982. - Т. 18. - № 1. - С. 41-72.

2. S z u m a n s k i P. Quelques solutions exactes des équations de l'hydrodynamique de fluides visqueus dans le cas d'un tube cylindrique // J. Math. Pures et Appl. / 1932. - V. 11(9). - P. 67-107.

3. Т а р г С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. - М.: Гостехиздат, 1951.

4. С л е з к и н Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. - М.: Гостехиздат, 1955.

5. П о п о в Д.Н. Обобщенное уравнение для определения касательных напряжений на стенке трубы при неустановившемся движении вязкой жидкости // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. - 1967. - № 5. - С. 52-57.

6. З и л ь к е В. Трение, зависящее от частоты при неустановившемся течении в трубопроводе. // Теоретические

основы инженерных расчетов - М.: Мир, 1968. - № I.-С. 120-127.

7. Letelier S.M., Leutheusser H.J. Skin friction in unsteady laminar pipe flow // J. Hydr. Div. ASCE. - 1976. - Vol. 102, NHY 1. - P. 41-56.

8. 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.

9. Acharad J.L., Lapinard G.M. Structure of the transient wallfriction law in one-dimensional models of laminar pipe flows // J. Fluid Mech. - 1981. - Vol. 113, - P. 263-293.

10. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. - М.: Машиностроение, 1982. - С. 240.

11. Letelier S.M.F., Leutheusser H.J. Unified approach to the solution of problems of unsteady laminar flow in long pipes // J. Appl. Mech. - 1983. - Vol. 50. N 1. - P. 8-12.

12. Айнола Л.Я., Лийв У.Р. Математические модели для нестационарных течений в трубах // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1985. - № 593.-С. 85-94.

Автоматизация эксперимента, накопление и обработка данных обеспечивается с помощью отечественной мини-ЭВМ СМ-4 (3). Передача данных в цифровой форме в ЭВМ производится через буферный интерфейс (БМ) 57020 фирмы DISA, Дания (12). Согласование БМ с ЭВМ осуществлено через разработанный и построенный нами 16-битный контроллер (4). Для согласования аналоговых сигналов датчиков разработано и изготовлено 8-канальное усилительно-коммутирующее устройство с 12-битным АЦП (13) и программируемый через ЭВМ таймер (11), подключаемые к БМ как внешние устройства (БВ). Через БМ осуществля-

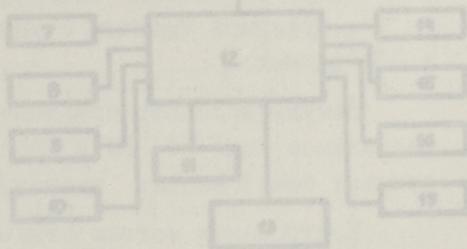


Рис.1.

L. Ainola, U. Liiv,  
E. Ruustal

Impulse Flows of Incompressible Fluid  
in Circular Pipes

Abstract

The equations describing the mean velocity of the unsteady flow using the Laplace transform together with asymptotical methods are derived. Proceeding from some typical form of the pressure impulse the variation of the instantaneous mean velocity and discharge are given. The value of the integrated friction coefficient for the final impulses and their comparison with the steady friction coefficient are observed.

3. Т а р т С. А. Основы теории ламинарных течений. - М.: Гостехиздат, 1953.
4. С т а л к и Н. А. Движение вязкой несжимаемой жидкости. - М.: Гостехиздат, 1953.
5. П о л я н Д. А. Основы теории для определения касательных напряжений на стенке трубы при неустановившемся движении вязкой жидкости. В: Вестн. вузов. Сер. Машиностроение. - 1967. - № 5. - С. 32-37.
6. З и л б е р В. Труба, закрытая от частоты при неустановившемся течении в трубе. // Теоретические

Э.Г. Каск, Т.А. Коппель,  
А.А. Лепп, Р.Ю. Руубел,  
Л.Э. Сарв

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

При решении задач автоматизации научного эксперимента часто возникает необходимость передачи в ЭВМ больших по объему и интенсивности потоков информации. Такого рода задачи нужно решать и при разработке современного измерительного комплекса для изучения гидродинамических процессов. В настоящей статье описывается созданный в лаборатории гидравлики Таллинского политехнического института автоматизированный измерительный комплекс.

Блок-схема измерительного комплекса изображена на рис. 1.

Автоматизация эксперимента, накопление и обработка данных обеспечивается с помощью отечественной мини-ЭВМ СМ-4 (3). Передача данных в цифровой форме в ЭВМ производится через буферный интерфейс (БИ) 57G20 фирмы DISA, Дания (12). Согласование БИ с ЭВМ осуществлено через разработанный и построенный нами 16-битный контроллер (4). Для согласования аналоговых сигналов датчиков разработано и изготовлено 8-канальное усилительно-коммутирующее устройство с 12-битным АЦП (13) и программируемый через ЭВМ таймер (11), подключаемые к БИ как внешние устройства (ВУ). Через БИ осуществля-

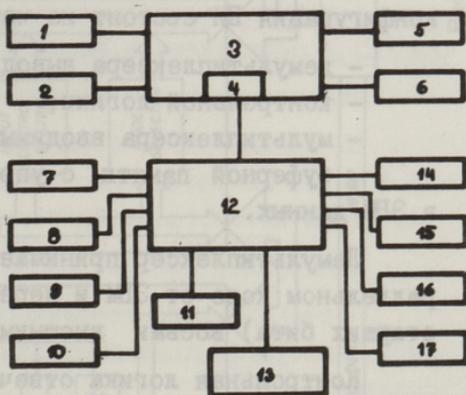


Рис.1.

ется и управление быстродействующим затвором (I4) и электромотором насоса (I5).

Два канала ЛДИС (7,8) подключаются к БИ через процессор сигналов следящего типа 55N20 фирмы DISA, Дания. Через БИ осуществляется и управление местоположения измерительного объема в исследуемой среде с помощью двух взаимно перпендикулярных координатников (9, 10). Каналы (I6, I7) являются свободными. К ЭЕМ подключены следующие периферийные устройства: графический дисплей VT-125 (I) фирмы DEC, США, графопостроитель WX4636 (2) фирмы WATANABE, Япония, накопители данных на магнитном диске (5) и на магнитной ленте (6).

БИ выполняет следующие три основные функции [I]:

- контрольного интерфейса при передаче данных в ЭЕМ;
- буферной памяти для сохранения асинхронно появляющихся данных из четырех разных сдвоенных I2-битных каналов;
- демультиплексера для управления ВУ.

Функциональная схема БИ изображена на рис. 2. Стандартная конфигурация БИ состоит из четырех плат:

- демультиплексера выводимых в ВУ данных;
- контрольной логики;
- мультиплексера вводимых в ЭЕМ данных;
- буферной памяти с управляющей логикой для вводимых в ЭЕМ данных.

Демультиплексер принимает I6-битную информацию в параллельном коде от ЭЕМ и передает по адресному коду (три старших бита) восьми внешним устройствам.

Контрольная логика отвечает за организацию замены информации между БИ и ВУ, определяет канал и его приоритет, модифицирует вводимые в ЭЕМ данные для сохранения в буферной памяти, проверяет временные характеристики между индивидуальными каналами и контролирует работу всего БИ.

Мультиплексер вводимых в ЭЕМ данных отвечает за правильный выбор нужного канала из четырех каналов ввода. Каналы являются сдвоенными - по одному передается информация о параметрах измерительного устройства, по другому измерительные данные. Длина слова I6 бит.

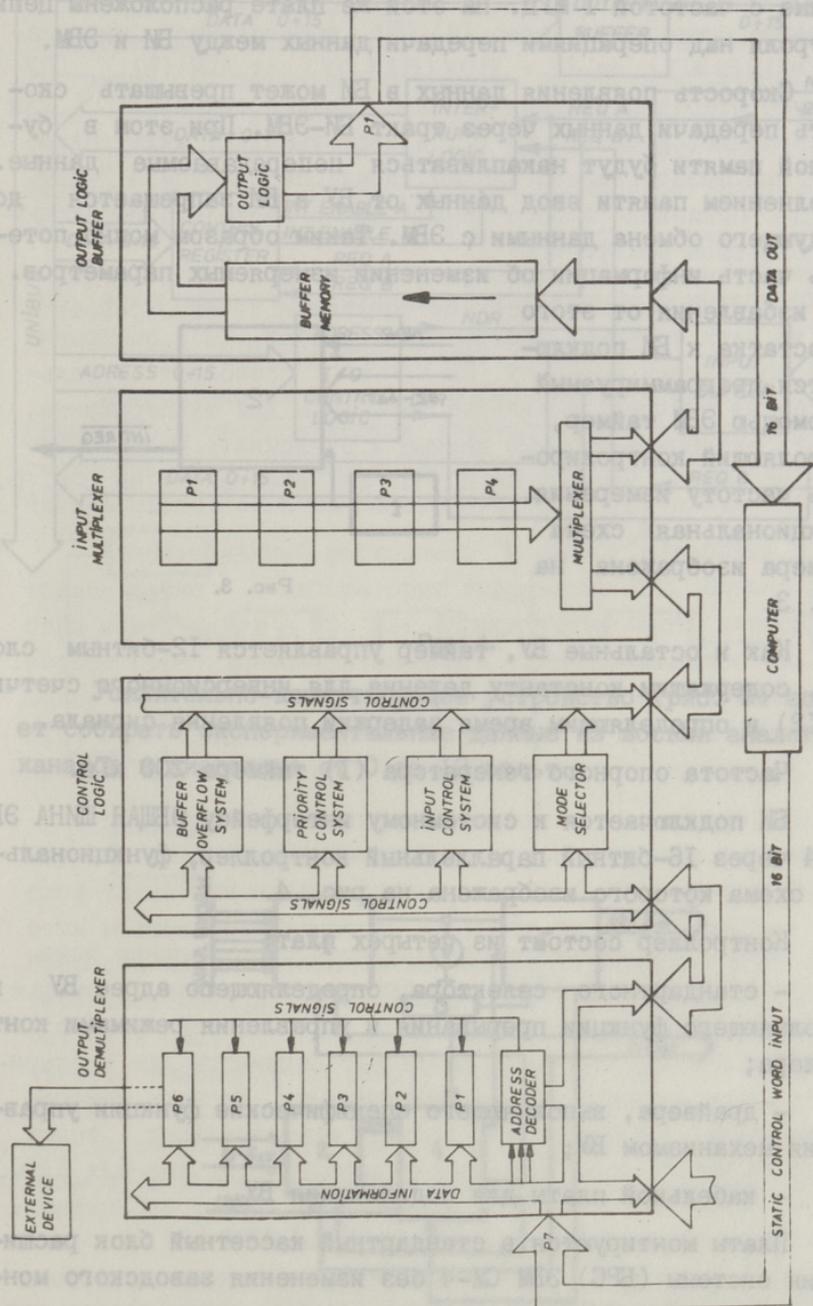


Рис. 2.

Буферная память (FIFO) емкостью 8 кбит организована для сохранения 512 16-битных слов и позволяет перевести данные с частотой 1 МГц. На этой же плате расположены цепи контроля над операциями передачи данных между БИ и ЭВМ.

Скорость появления данных в БИ может превышать скорость передачи данных через тракт БИ-ЭВМ. При этом в буферной памяти будут накапливаться непередаваемые данные. Заполнением памяти ввод данных от ВУ в БИ запрещается до следующего обмена данными с ЭВМ. Таким образом можно потерять часть информации об изменении измеряемых параметров. Для избавления от этого недостатка к БИ подключается программируемый с помощью ЭВМ таймер, позволяющий контролировать частоту измерения. Функциональная схема таймера изображена на рис. 3.

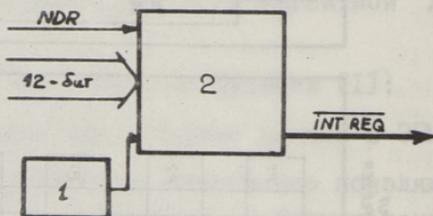


Рис. 3.

Как и остальные ВУ, таймер управляется 12-битным словом, содержащим константу деления для инверсионного счетчика (2) и определяющим время задержки появления сигнала.

Частота опорного генератора (1) таймера 200 кГц.

БИ подключается к системному интерфейсу ОБЩАЯ ШИНА ЭВМ СМ-4 через 16-битный параллельный контроллер, функциональная схема которого изображена на рис. 4.

Контроллер состоит из четырех плат:

- стандартного селектора, определяющего адрес ВУ и выполняющего функции прерывания и управления режимами контроллера;
- драйвера, выполняющего специфические функции управления механизмом ВУ;
- кабельной платы для подключения ВУ.

Платы монтируются в стандартный кассетный блок расширения системы (БРС) ЭВМ СМ-4 без изменения заводского монтажа. Наивысшая скорость передачи данных определяется скоростью процессора ЭВМ.

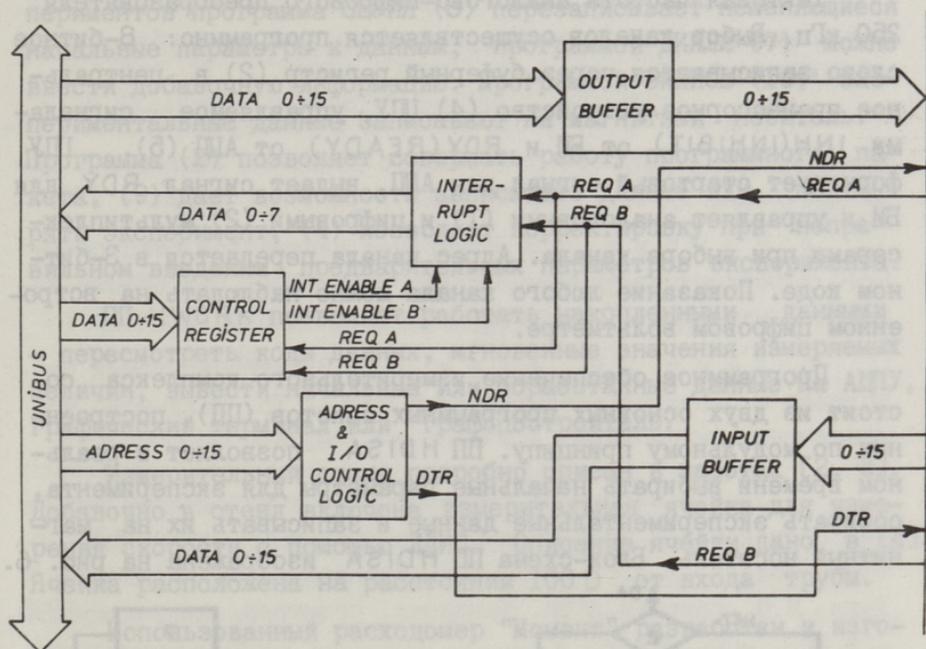


Рис. 4.

Усилительно-коммутирующее устройство (рис. 5) позволяет собирать экспериментальные данные из восьми аналоговых каналов в диапазоне от 0 до 10 вольт.

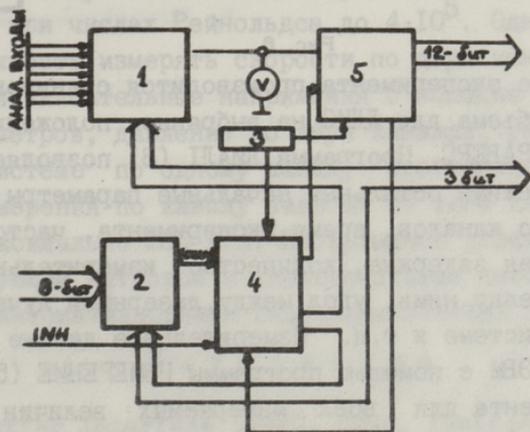


Рис. 5.

Тактовая частота аналогово-цифрового преобразователя 250 кГц. Выбор каналов осуществляется программно: 8-битное слово записывается через буферный регистр (2) в центральное процессорное устройство (4) ЦПУ, управляемое сигналами  $INH(INHIBIT)$  от БИ и  $RDY(READY)$  от АЦП (5). ЦПУ формирует стартовый сигнал для АЦП, выдает сигнал  $RDY$  для БИ и управляет аналоговыми (1) и цифровыми (2) мультиплексерами при выборе канала. Адрес канала передается в 3-битном коде. Показание любого канала можно наблюдать на встроенном цифровом вольтметре.

Программное обеспечение измерительного комплекса состоит из двух основных программных пакетов (ПП), построенных по модульному принципу. ПП HDISA позволяет в реальном времени выбирать начальные параметры для эксперимента, собирать экспериментальные данные и записывать их на магнитный носитель. Блок-схема ПП HDISA изображена на рис. 6.

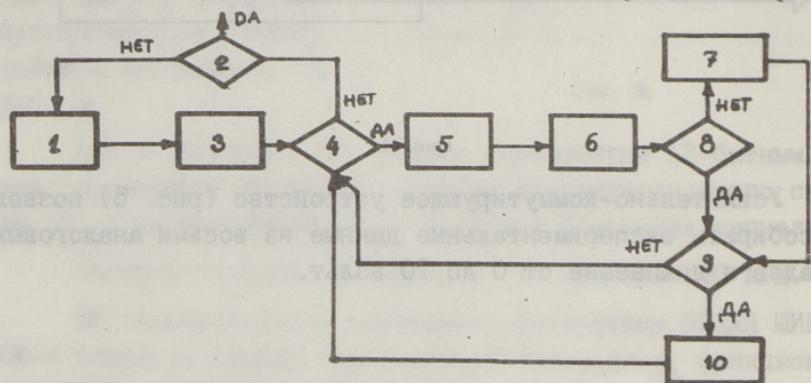


Рис. 6.

В начале эксперимента производится сканирование измерительного объема для ЛДИС на выбранное положение с помощью программы ТРАВЕРС. Программа ДИАЛОГ (3) позволяет ввести в диалоговом режиме остальные начальные параметры для эксперимента - число каналов, время эксперимента, частота измерения, временная задержка, количество измерительных точек, расстояния между ними, угол между лазерными лучами для ЛДИС, давление в системе и т.д. Измерительные данные записываются в память ЭВМ с помощью программы ИЗМЕРЕНИЕ (5). По данным эксперимента для всех измеряемых величин программа КОНТРОЛЬ (6) вычисляет минимальные и максимальные значения, а также стандартные моменты. При выполнении серийных экс-

периментов программа СЕРИЯ (8) перезаписывает неменяющиеся начальные параметры к данным, программой ДИАЛ2 (7) можно ввести добавочную информацию. Программой ЗАПИСЬ (10) экспериментальные данные записывают на магнитный носитель. Программа (2) позволяет совершать работу программного пакета, (9) дает возможность записывать данные или повторять эксперимент, (4) позволяет корректировку при неправильном введении предварительных параметров эксперимента.

III WORK позволяет работать накопленными данными — пересмотреть коды данных, мгновенные значения измеряемых величин, вывести начальные или обработанные данные на АЦПУ, графический терминал или графопостроитель.

Измерительный стенд подробно описан в работах [2, 3]. Добавочно в стенд включена измерительная ячейка для измерения скорости с помощью ЛДИС. Описание ячейки дано в [4]. Ячейка расположена на расстоянии 100 D от входа трубы.

Использованный расходомер "Момент" разработан и изготовлен также в лаборатории гидравлики ТПИ. Описание прибора можно найти в [5, 6]. Аппаратурная часть термоанемометров изготовлена фирмой DISA, Дания. В качестве датчиков давления применяются тензометрические датчики LX415/10, позволяющие измерять в пределах  $0-10^6$  Н/м<sup>2</sup>, частотным диапазоном 0-500 Гц и основной погрешностью 0,28 %.

Настоящий измерительный комплекс со стендов позволяет изучать стационарные и нестационарные течения в цилиндрической трубе при числах Рейнольдса до  $4 \cdot 10^5$ . Одновременно есть возможность измерять скорости по двум каналам ЛДИС, скорость или касательные напряжения с помощью двух каналов термоанемометров, давление по двум каналам, расход и температуру в системе по одному каналу. Программно реализуемая частота измерения по каналу зависит от типа датчиков и достигает максимально 200 кГц. Программное управление быстроедействующим затвором и электромотором насоса позволило полностью автоматизировать гидродинамический эксперимент.

#### Л и т е р а т у р а

1. Buffer Interface 57G20, DISA, Instruction and Service Manual, 1982.

2. Л и й в У.Р. Экспериментальное исследование гидравлических характеристик потока жидкости в трубах / Изд. АН СССР // Водные ресурсы. - 1981. - № 3. - С. 139-145.

3. Л и й в У.Р. Теоретические и экспериментальные основы расчета напорного ускоренного движения жидкости в цилиндрических трубах. Диссертация д-ра техн. наук. - 1983.

4. Р у у б е л Р.Ю. Измерение параметров стационарного турбулентного течения жидкости в трубе при помощи лазерного измерителя скорости (см. наст. сб., с. 101-115).

5. Л а м п Ю.Ю., Л и й в У.Р. Электромагнитный расходомер с частотой возбуждения 500 Hz // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1983. - № 553. - С. 41-49.

6. Электромагнитные расходомеры с кодированным выходным сигналом для измерения быстропеременных скоростей в трубопроводе / Э.Г. Каск, Т.А. Коппель, В.К. Корсен, У.Р. Лийв, М.П. Россман // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1975. - № 380. - С. 38-42.

Е. Kask, Т. Koppel, А. Lepp,  
R. Ruubel, L. Sarv

The System of Measurements for Hydrodynamic  
Investigation in the Pipes

Abstract

The system of measurements on the basis of the computer SM-4 for the investigation of the steady and unsteady fluid flow in the pipes is described. Some ways are given for the connection of the measuring system to the computer for conducting and automating the experiment.

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫХ  
ТЕЛ В ТРУБЕ

В настоящее время наблюдается интенсивное применение последних достижений науки и технологии в различных областях прикладной техники. Одна такая тенденция наблюдается также в экспериментальной гидромеханике, где конкретным примером могут служить схемы и методы, разработанные для лазерной анемометрии [1, 2, 3, 4]. В данной работе не рассматриваются общие принципы лазерной анемометрии, а только дифференциальный метод с обратным рассеиванием. По принятой схеме были проведены расчеты оптической системы отдельных элементов, а также изготовлена и проведена настройка лазерного измерителя скорости. Рассматривается использование однокомпонентного лазерного измерителя скорости для измерения двух конкретных состояний — жидкости и твердого тела.

## Оптическая схема

В дифференциальной схеме лазерные лучи пересекаются в одной точке, в области измерения. При условии, что частоты обоих лучей являются одинаковыми, доплеровский сдвиг частоты определяется по известной формуле:

$$f_D = \frac{V_x \cdot 2 \sin \theta / 2}{\lambda}, \quad (I)$$

где  $V_x$  — скорость движения частиц;

$\theta$  — угол между лучами;

$\lambda$  — длина волн лазерного источника.

Дифференциальный метод измерения часто называют методом интерференционной картины. Такое название определяется

тем обстоятельством, что два сфокусированных лазерных луча при пересечении интерферируются. При этом в различных точках пространства происходит усиление или ослабление результирующей амплитуды световых волн в этих точках. Два луча, интерферируя на фотокатоде, создают биения тока фотокатода с частотой, разность которой пропорциональна  $V_x$ , причем частота не зависит от направления вектора рассеянного света, что позволяет использовать максимальные приемные апертуры. Кроме так называемой доплеровской интерпретации существует и времяпролетный метод описания процесса. Пространственный период интерференционной картины определяется по зависимости

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin \theta/2}. \quad (2)$$

Частицы, пролетая через интерференционные полосы, периодически рассеивают свет с частотой  $V_x/d_f$ .

Оптическая схема построена следующим образом. Источником лазерного излучения является одномодовый гелий-неоновый лазер ЛП-79-1, который излучает линейно поляризованный свет, плоскость которого составляет  $45^\circ$  относительно вертикальной оси. Имеется возможность использования лазера и параллельно с оптической системой, используя две призмы. После прохождения двух призм луч попадает на первую линзу Л<sub>1</sub>, которая фокусирует луч на радиальную дифракционную решетку Д<sub>1</sub>. Дифракционная решетка используется для получения частотного сдвига в пределах от 0 до 600 кГц и определяется по формуле

$$f_s = f_r \cdot m \cdot N_1, \quad (3)$$

где  $f_r$  - частота вращения эл. двигателя;

$m$  - коэффициент, зависящий от дифракции;

$N$  - количество штрихов на диске.

Использование на радиальном диске дифракционной решетки для получения сдвига частоты рассматривается многими авторами [5, 6, 7]. Достоинством дифракционной решетки в данной схеме является и возможность расщепления лазерного луча. В качестве электродвигателя (М) был использован ДПР-32-Н1-02 со специальным регулятором скорости вращения. После прохождения луча через дифракционную решетку дифракционные максимумы +1 и -1 порядка направляются на вторую линзу Л<sub>2</sub>. После прохождения линзы лучи диаметром 3 мм раздвигают-

ся при помощи специальной системы зеркал и расстояние между лучами составляет 61 мм. Прохождение лучей через четвертьволновые пластинки  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  дает нам возможность рассматривать лучи как ортогонально поляризованные. Разные методы получения поляризации рассмотрены в литературе [11, 12]. Специальный регулятор расстояния Р.Р. направляет (схема А, рис. 1) два параллельных луча на переднюю линзу  $L_3$ , которая фиксирует их на измерительную точку, и образуется измерительный объем. При этом угол  $\theta$  может изменяться от 2 до  $16^\circ$ . Диаметр пучка в пересечении составляет 32 мкм.

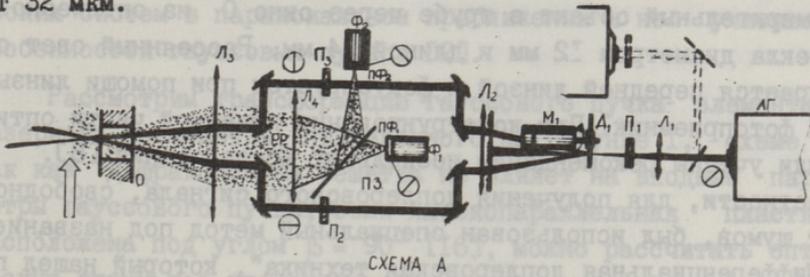


СХЕМА А

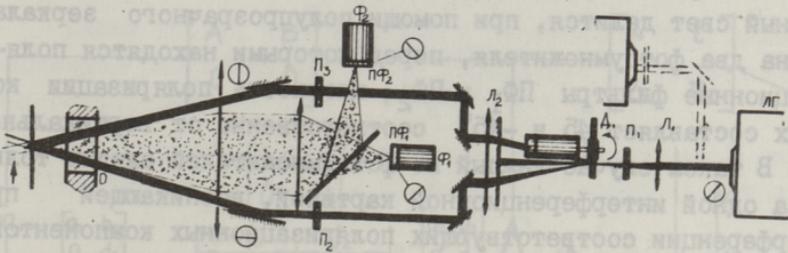


СХЕМА Б

Рис. 1. Общий вид лазерного измерителя скорости.

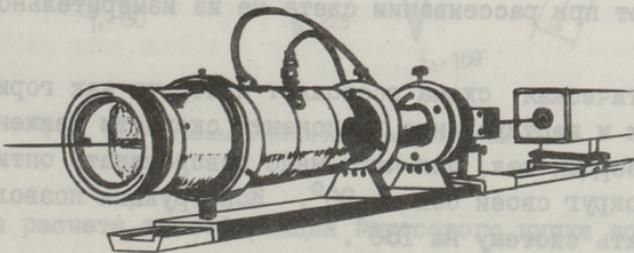


Рис. 2. Общий вид анемометра.

На схеме Б угол сведения является неизменным и составляет  $10^\circ$ , при этом  $d_p = 3,31$  мкм. Число интерференционных полос  $N' = 1200$ . Схема Б предназначена для определения локальной скорости твердых тел. Общий вид лазерного анемометра приведен на рис. 2.

На схеме Б два ортогонально поляризованных пучка направляются в одну точку, расстояние которой соответствует фокусному расстоянию передней линзы (230 мм), при помощи двух призм. Пучки не меняют форму, поскольку передняя линза оснащена специальными резьбами. Лазерные лучи попадают на измерительный объект в трубе через окно  $O$  из оптического стекла диаметром 12 мм и длиной 24 мм. Рассеянный свет собирается передней линзой и фокусируется при помощи линзы  $L_4$  на фотоприемник. При конструировании приемной части оптики были учтены рекомендации нескольких исследований [8]. В частности, для получения доплеровского сигнала, свободного от шумов, был использован специальный метод под названием "Дифференциальная доплеровская техника", который нашел применение во многих оптических схемах лазерной анемометрии, особенно при измерении скорости твердых тел [9, 10]. Рассеянный свет делится, при помощи полупрозрачного зеркала ПЗ, на два фотоумножителя, перед которыми находятся поляризационные фильтры  $ПФ_1$  и  $ПФ_2$ , плоскость поляризации которых составляет  $45^\circ$  и  $-45^\circ$  соответственно от вертикальной оси. В таком случае каждый из фотоумножителей следит только за одной интерференционной картиной, возникающей при интерференции соответствующих поляризационных компонентов (компонент исходного луча), которые раздвинуты в пространстве на величину  $d_p/4$ . Деление сигналов, полученных из двух фотоумножителей, дает нам увеличение доплеровского сигнала вдвое и уменьшение до минимума шумов, которые возникают при рассеивании света не из измерительного объема.

Оптическая схема позволяет измерять как горизонтальные, так и вертикальные компоненты скорости движения жидкости твердых тел, для чего надо поворачивать оптическую часть вокруг своей оси на  $90^\circ$ . Конструкция позволяет поворачивать систему на  $180^\circ$ .

## Анализ оптической системы

Основные метрологические характеристики лазерного доплеровского анемометра, такие, как локальность и точность измерений, во многом определяются его оптической системой.

Параметры интерференционного поля в измерительном объеме, образованном пересечением двух гауссовых пучков, зависят от размеров пучков, угла их пересечения и расфокусировки, т.е. несовпадения положения перетяжки пучков с точкой их пересечения.

Методы Фурье-оптики пригодны только для расчета оптических систем в параксиальном приближении и не учитывают особенностей гауссовых пучков [2].

Рассмотрим трансформацию гауссового пучка элементами лазерного анемометра, приведенного на рисунке 1, схеме А. Так как дифракционная решетка не влияет на входные параметры гауссового пучка, если плоскопараллельная пластина расположена под углом  $\beta = 90^\circ$  [16], можно рассчитать оптическую схему как трехлинзовую с телескопическим расширением пучка (рис. 3).

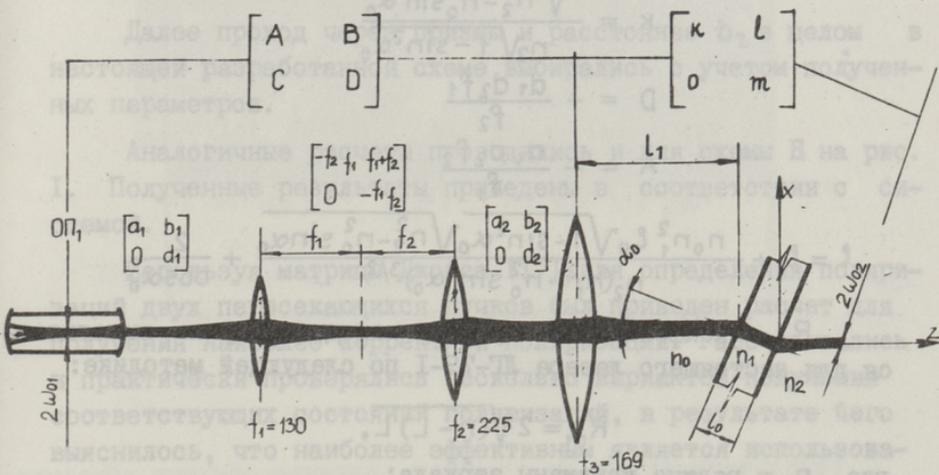


Рис. 3. Матрицы передачи оптической системы.

Для расчета трансформации гауссового пучка воспользуемся методом матриц передачи. Такой подход рассматривается во многих работах [13, 14, 15].

Рассмотрим схему трехлинзовой зондирующей системы с телескопическим элементом, в которой изображен один из зондирующих пучков. Матрица передачи преобразования гауссового пучка имеет вид

$$M_T = \begin{bmatrix} f_2/f_1 & f_1+f_2 \\ 0 & -f_1/f_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

т.е. матрица передачи телескопического элемента.

При этом рассчитаем параметры при выбранных условиях:

1. Перетяжка пучка находится на поплавке на расстоянии  $l$  мм от поверхности окна.

2. Толщина окна 22 мм, диаметр 24 мм.

Конфокальный параметр выходного пучка определяется зависимостью

$$R_{02} = \frac{f_3^2 D k + \sqrt{f_3^2 D^2 k^2 - 4 R_{01}^2 (l - k f_3)^2 A^2}}{2 R_{01} A}. \quad (5)$$

Величина  $l$  определяется зависимостью [13] (рис. 3)

$$k = \frac{\sqrt{n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0}}{n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0}}$$

$$D = -\frac{d_1 d_2 f_1}{f_2}$$

$$A = -\frac{a_1 a_2 f_2}{f_1}$$

$$l = l_1 + \frac{n_0 n_1^2 l_0 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0} \sqrt{n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0}}{n_2 (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0)^{3/2}} + \frac{2}{\cos \alpha_0}$$

$R_{01}$  - конфокальный параметр исходного пучка выполняется для настоящего лазера ЛЛ-79-I по следующей методике:

$$R_{01} = 2 \sqrt{(r - L) L},$$

где  $r$  - радиус кривизны зеркала;

$L$  - расстояние между зеркалами.

$$R_{01} = 2 \sqrt{(2000 - 780) \cdot 780} = 1952 \text{ мм.}$$

Диаметр перетяжки лазерного пучка

$$2w_{01} = \sqrt{\frac{\lambda R_{01}}{2\pi}} = 0,88 \text{ мм.}$$

После решения соотношения (5) получаем:

$$R_{02} = 0,0106 \text{ м.}$$

Размер перетяжки

$$2w_{02} = \sqrt{\frac{\lambda R_{02}}{2\pi}} = 32 \text{ мкм.}$$

Перетяжка лазерного пучка находится на исследуемом расстоянии, если выполняется условие:

$$b_2 = f_2 + f_3 + f_1 - b_1 + (l - f_3 k) R_{01} / R_{02}, \quad (6)$$

где  $f_1, f_2, f_3$  - соответствующие фокусные расстояния I, 2 и 3 линзы.

Расстояние  $b_1$  между опорной плоскостью I и первой линзой определяется при условии, что перетяжка находится в середине резонатора лазера, а также определяется расстояние при проходе лазерного пучка через призмы.

После решения совместности (6) получаем:

$$b_2 = 0,652 \text{ м.}$$

Величина  $b_1$  определяет расстояние между передней линзой и линзой с фокусным расстоянием  $f_2$ .

Далее проход через призмы и расстояние  $b_2$  в целом в настоящей разработанной схеме выбирались с учетом полученных параметров.

Аналогичные расчеты проводились и для схемы Б на рис. I. Полученные результаты приведены в соответствии с системой.

Используя матрицы Джонса [17], для определения поляризаций двух пересекающихся пучков был приведен расчет для получения наиболее корректной поляризации. Рассчитывались и практически проверялись несколько вариантов получения соответствующих состояний поляризаций, в результате чего выяснилось, что наиболее эффективным является использование трехчетвертьволновых пластин ( $P_1, P_2, P_3$ ). При компактном варианте, когда лазерный излучатель находится параллельно с оптической частью, целесообразно использовать еще одну четвертьволновую пластину на выходе луча из источника.

## Исследование сигнала

При измерении скорости течения жидкости необходимо дополнительно добавить в исследуемую жидкость частицы, которые рассеивают свет. Использование дополнительных частиц в определенном количестве повышает величину сигнала и тем самым облегчает последовательную обработку сигнала.

При использовании выработанной схемы была проведена серия опытов для определения влияния параметров поверхности твердого тела на выходной сигнал фотоумножителя. Из нержавеющей стали были изготовлены гладкоповерхностные опытные образцы диаметром 30 мм. Образцы обрабатывались химически для получения разной структуры поверхности. Основное внимание сосредоточилось на получении поверхности одинаковой структуры, но с разными размерами частиц от 1 до 10 мкм.

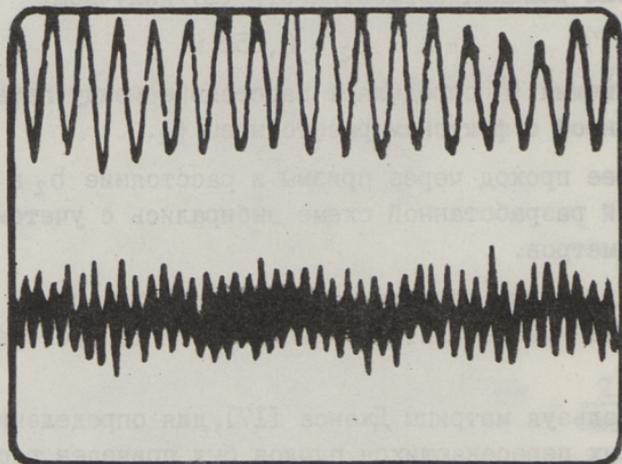


Рис. 4. Выходные сигналы от фотоумножителя.

Результаты измерения скорости движения опытных образцов при скорости 2300 об/мин показали, что наиболее точный и качественный сигнал был зафиксирован при размерах частиц 2,0 мкм. Значение выходного сигнала и фотография поверхности приведены на рис. 4,5.



Рис. 5. Структура поверхности, по которой измерялся выходной сигнал.

Использование методики для получения поверхности с размерами частиц 2 мкм дает возможность обрабатывать соответственно уже конкретные объекты измерения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Р у д н и ц к и й А.П. Применение лазерной анемометрии в гидродинамике // Автометрия. - 1979. - № 4.
2. Р и н к е в и ч у с Б.С. Лазерная анемометрия. - М.: Энергия, 1978.

3. Д у б и н ц е в Ю.Н., Р и н к е в и ч у с Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. - М.: Наука, 1982. - С. 304.

4. D u r s t F., Z a r e M. Bibliography of laser Doppler anemometry literature. DBR: Universität Karlsruhe, 1974.

5. S t e v e n s o n W.H. Optical frequency shifting by means of a rotating diffraction grating // Appl. Optics. - 1970. - Vol. 9, N 3.

6. O l d e n g r a m J. Venkatesh Prabha. A simple two-component laser Doppler anemometer using a rotating radial diffraction grating // Physics E: Scient. Instruments. - 1978, - Vol. 9.

7. W a n g C.P. Doppler velocimeter using diffraction grating and white light // Applied Optics. - Vol. 13, N 5. - 1974.

8. L a d i n g L. Differential Doppler heterodying technique // Applied Optics. - 1971. - Vol. 10, N 8.

9. B o s s e l H.H., H i l l e r W.J., M e i e r G.A. Noise cancelling signal difference method for optical velocity measurements // J. of Physics E. - 1972. - Vol. 5.

10. B r u c e E., T r u a x F.C. Demarest. Laser Doppler velocimeter for velocity and length measurements of moving surfaces // Applied Optics. - 1984. - Vol. 23, N 1.

II. К у л е ш В.П. Поляризованные узлы для ЛДИСов // Тр. центр. аэрогидродинамического ин-та. - 1976 г. Вып. 1750: Сб. № I.

12. В о л к о в а Е.А. Поляризационные измерения. - М.: Изд-во стандартов, 1974.

13. Б о г д а н о в С.В., Р и н к е в и ч у с Б.С., Ч у д о в В.Л. Трансформация гауссового пучка элементами лазерного анемометра // Квантовая электроника. - 1978. - № 7.

14. К о г е л н и к Li. Propagation law for the fundamental mode // Appl. Opt. - 1966. - 5, N 10.

15. Джерард А., Бечч Дж. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978. - 341 с.

16. Смирнов В.И., Тимофеев А.С. Анализ трансформации гауссового пучка в оптической системе сканирования // Тр. ТЭИ. - 1981. - № 535.

17. Шеклиф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ  
ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ  
СКОРОСТИ

В лаборатории гидравлики Таллинского политехнического института внедрен двухканальный лазерный доплеровский измеритель скорости фирмы "DANTEK", Дания. Измеряются стационарные и нестационарные течения в цилиндрической трубе с

E. Daniel

A One Component Laser Doppler Velocimeter for  
Measuring Liquids and Solid Bodies

Abstract

A One Component Laser Velocimeter has been developed for measuring fluids and solid surfaces. A diffraction grating disc is used to achieve frequency shift (up to 1MHz) and the beam expansion. Two beams are pointed in the first case by means of front lens, and in the second case by the use of two prisms. Matrix calculation has been carried out for optical system. Due to the non-uniformity of the surface the Differential Doppler Technique is used for cancelling noise in the output signal.

The output signal of the velocimeter was studied from chemically treated solid test bodies. For the treatment of the object of measurement a technology was used which gave the most qualified output signal.

стей;

- измеряется скорость в строго определенном направлении;

- имеется возможность измерять сразу три компоненты вектора скорости;

- скорость является линейной функцией от измеряемого сигнала - частоты доплеровского сигнала.



ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ  
ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ  
СКОРОСТИ

В лаборатории гидравлики Таллинского политехнического института внедрен двухканальный лазерный доплеровский измеритель скорости фирмы "ДАНТЕК", Дания. Измеряются стационарные и нестационарные течения в цилиндрической трубе с помощью автоматизированного измерительного комплекса, описанного в [1]. В настоящей статье дается краткое описание метода ЛДИС, обзор о возможных искажениях доплеровского сигнала и о возможностях их корректировки. Описывается методика проведения эксперимента и сравнение полученных данных для стационарного турбулентного течения с литературными.

Описание метода ЛДИС

ЛДИС является в настоящее время самым удобным и универсальным методом для измерения скорости в лабораторных условиях. ЛДИС обладает следующими достоинствами:

- практически не возмущает изучаемый поток;
- достигается большое пространственное и временное разрешение;
- не требуется дополнительная калибровка;
- обеспечивается широкий диапазон измеряемых скоростей;
- измеряется скорость в строго определенном направлении;
- имеется возможность измерять сразу три компоненты вектора скорости;
- скорость является линейной функцией от измеряемого сигнала - частоты доплеровского сигнала.

К недостаткам ЛДИС можно отнести относительную сложность аппаратуры и возможность работы только с оптически прозрачными жидкостями.

В основе метода лазерного доплеровского измерителя скорости лежит эффект Доплера, заключающийся в том, что при рассеянии монохроматической световой волны на движущихся оптических неоднородностях появляется сдвиг частоты света, пропорциональный скорости движения неоднородностей.

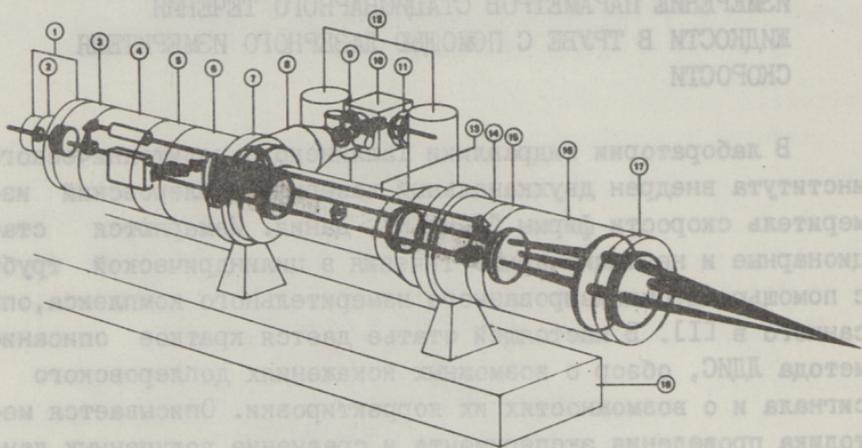


Рис. 1.

Оптические схемы передающей и принимающей оптики для двухкомпонентного ЛДИС изображены на рис. 1 и 2 соответственно [2].

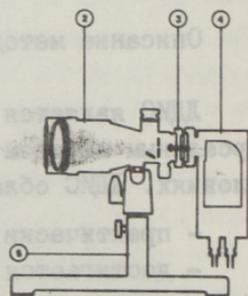


Рис. 2.

Луч света от лазера делится призмой 3 на два идентичных пучка. Первый, проходящий призму без отклонения, проходит ячейку Брэгга 4. Второй, отклоненный луч, направляется для сохранения одинаковых длин оптических путей через стеклянный столб. В оптоакустической ячейке Брэгга модулируется частота падающего луча частотой так называемого оптического смещения 40 МГц. В сочетании с электронным смещением частоты ячейка Брэгга обеспечивает управляемое смещение доплеровской частоты, позволяющее разделить низкочастотный пьедестал от высокочастотного сигнала и определить направление вектора скорости.

Луч с частотным оптическим смещением направляется на светоразделяющую призму 6, откуда выходит два монохроматических луча с разными длинами волн 488 и 514,5 нм. Эти лучи вместе с исходным пучком из лазера направляются на отклоняющие призмы 14 через расширитель лучей 16 и фокусирующую линзу 17.

Для получения оптимального измерительного объема, перетяжки лучей, местоположение которых регулируется системой линз I, должны находиться в точке пересечения лучей, а точка пересечения должна находиться на оптической оси фокусирующей линзы. Чтобы лучи пересекались в одной точке с любым углом поворота направляющей оптики вокруг оси поворота; последнее должно совпадать с оптической осью системы, лучи должны быть параксиальными и на равных расстояниях от оптической оси. Правильный угол плоскости поляризации исходного лазерного луча относительно светоразделяющей призмы для получения наилучшего разделения лучей разными длинами волн получается с помощью четвертьволновых пластин на выходе из лазера и при входе в оптическую систему.

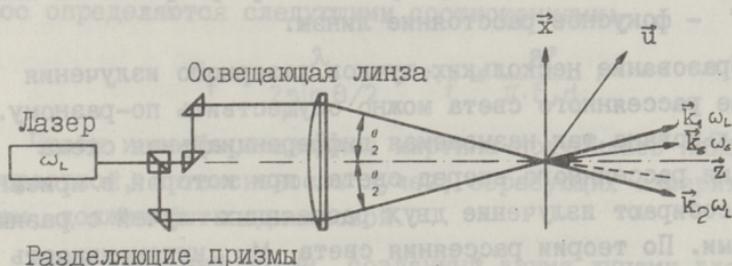


Рис. 3.

На рис. 3 изображены векторы падающей и рассеянной волны для измерения скорости при дифференциальной схеме детектирования доплеровского сигнала.

Плоскопараллельные волновые фронты описаны волновыми векторами  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  падающего света,  $\vec{k}_s$  рассеянного света, частотами излучения лазера  $\omega_L$  и доплеровского сдвига  $\omega_D$ . Доплеровский сдвиг определен как

$$\omega_D = \vec{u} \cdot (\vec{k}_s - \vec{k}_i),$$

где  $\vec{u}$  - измеряемая компонента скорости.

Обычно свет, рассеянный от движущейся частицы и содержащий доплеровский сигнал, смешивают на фотоприемнике с исходным излучением от лазера. Фотодетектор измеряет тогда разницу в частоте между двумя рассеянными лучами рис. 3

$$\omega_{D1} = \vec{u} \cdot (\vec{k}_s - \vec{k}_1),$$

$$\omega_{D2} = \vec{u} \cdot (\vec{k}_s - \vec{k}_2),$$

$$\omega_D = \omega_{D1} - \omega_{D2} = \vec{u} \cdot (\vec{k}_1 - \vec{k}_2)$$

или в координатной системе с рис. 3

$$f_D = \frac{2u_i}{\lambda} \sin \theta/2,$$

где  $f_D$  - доплеровская частота;

$u_i$  - компонента скорости, перпендикулярна биссектрисе угла схождения падающих лучей;

$\lambda$  - длина волны лазерного излучения;

$\theta$  - угол схождения падающих лучей.

$$\theta/2 = \arctg \frac{d}{2f},$$

где  $d$  - расстояние между лучами на фокусированной линзе;

$f$  - фокусное расстояние линзы.

Образование нескольких пучков лазерного излучения и собрание рассеянного света можно осуществить по-разному. Нами использована так называемая дифференциальная схема для измерения рассеянного вперед света, при которой в приемную оптику собирают излучение двух рассеянных лучей с разными частотами. По теории рассеяния света  $M_u$  интенсивность рассеянного вперед света на 2-3 порядка выше, чем для рассеянного обратно света. При использовании дифференциальной схемы доплеровская частота не зависит от геометрии рассеяния света.

Объектив приемной оптики образует телескопическую систему. Объектив 2 (рис. 2) располагается на фокусном расстоянии от измерительного объема. Расчет параметров линзы выведен из того, что линейный размер измерительного объема принимающей оптики вдоль оптической оси не должен превышать 0,1 мм и сигнал от центральной части был бы в 10 раз больше, чем сигнал, получаемый около границ измерительного объема.

Детектированная частота зависит линейно от компоненты скорости частицы. ЛДЭС не чувствителен к другим компонентам

скорости и для данного угла схождения лучей  $\theta$  зависимость от температуры и давления содержится в длине волны  $\lambda$  лазерного луча.

Статистическая передаточная функция для ЛДИС определяется как сумма двух частот

$$f_T = f_D + f_s = \frac{2u_i}{\lambda} \sin \theta/2 + f_s,$$

где  $f_T$  - частота, за которой будет следить процессор сигнала;

$f_s$  - суммарное частотное смещение для доплеровской частоты.

Измеренную фотодетектором доплеровскую частоту можно представить как частоту модуляции интенсивности рассеянного света при прохождении движущейся частицы через интерференционное поле. Такое представление является правдоподобным при достаточно большой апертуре принимающей оптики - оно описывает только некогерентное детектирование. Расстояние между полосами интерференционной картины и количество полос определяются следующими соотношениями:

$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \sin \theta/2}, \quad N_f = \frac{\delta f}{\pi \cdot E \cdot d}.$$

Чтобы интерференционная картина получилась наиболее контрастной, интенсивность лучей, образующих измерительный объем, должна быть одинаковой.

Измерительный объем, созданный двумя лучами для измерения одной компоненты скорости, можно определить как эллипсоид, на границах которого частица рассеивает свет, фототок от которого уменьшается в  $1/e^2$  раз по сравнению с интенсивностью рассеянного света от частицы, проходящей через центр. При этом предполагается, что распределение интенсивности в падающем луче подчиняется нормальному распределению. Созданный лучами измерительный объем описывается уравнением

$$x^2 \cos^2 \theta/2 + y^2 + z^2 \sin^2 \theta/2 = r_0^e.$$

Нужно различать измерительный объем, созданный сходящимися лучами, от рассеивающего объема, сигнал от которого является основанием для детектирования сигнала. Последний зависит не только от направляющей оптики, но и от

принимающей оптике, метода измерения, напряжения фотоумножителя, мощности падающего излучения, усиления сигнального процессора, количества и геометрии рассеивающих частиц, вида обработки сигнала, от интенсивности флуктуации компонент скорости.

Благодаря хаотической дисперсии рассеянных частиц в пространстве, фаза и амплитуда доплеровского сигнала будут флуктуировать случайным образом. Это приводит к появлению так называемого доплеровского шума - демодуляции непрерывных доплеровских сигналов. Использование ЛДИС показывает, что при изучении нестационарного течения в доплеровском сигнале нельзя разделить фазовых флуктуаций от флуктуации измеряемой скорости. Теория для объяснения этой неопределенности, критерии для ее минимизации, условия для проведения экспериментов и интерпретации данных приведены в пособии [3]. Случайные флуктуации фазы можно выразить через параметр  $\Delta\omega$

$$\Delta\omega^2 = \Delta\omega_L^2 + \Delta\omega_G^2 + \Delta\omega_T^2,$$

где  $\Delta\omega_L$  - искажение доплеровской частоты из-за неодинакового времени пребывания частиц в рассеивающем объеме;

$\Delta\omega_T$  - искажение доплеровской частоты из-за флуктуации скорости в рассеивающем объеме;

$\Delta\omega_G$  - искажение доплеровской частоты из-за градиента скорости в рассеивающем объеме.

Согласно источнику [4] каждую составляющую для сигнального процессора следящего типа можно выразить следующим образом:

$$\Delta\omega_L = \frac{\bar{u}}{\sqrt{2\sigma_1}}; \quad \Delta\omega_G = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta/2 \cdot \left(\frac{d\bar{u}}{dy}\right) \sigma_2; \quad \Delta\omega_T = 2\sqrt{2} \frac{\bar{u}}{\sigma_2},$$

и фазовый шум на выходе процессора следящего типа без фильтрации

$$S(\omega) = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \Delta\omega,$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - размеры рассеивающего объема;

$\bar{u}$  - средняя скорость в точке;

$\theta$  - угол между лучами, составляющими измерительный объем.

Для измерений в трубе можно писать:

$$\bar{u} = \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_y = \frac{u_*^2 y}{\nu}; \quad d\bar{u} = \frac{u_*^2}{\nu} dy.$$

Берман и Даннинг [5] показывают, как изменяются величины, входящие в  $\Delta\omega$ , при турбулентном течении в трубе. В центре потока градиент скорости маленький и доминируют  $\Delta\omega_T \approx \Delta\omega_G$ . Около стенки, где интенсивность турбулентности и градиент скорости побольше, доминируют  $\Delta\omega_L$  и  $\Delta\omega_T$ .

Для минимизации влияния фазовых флуктуаций во всех ситуациях измерения в работе [6] советуют пользоваться подходящим по величине рассеивающим объемом. Если рассеивающий объем намного меньше, чем неоднородности турбулентности, то измеряемую скорость можем принимать как скорость в центре рассеивающего объема. Эдвардс и др. [7] показали, что, если профиль скорости имеет явную кривизну в рассеивающем объеме, то измеряемая скорость получается по величине больше, чем ее действительное значение в центре рассеивающего объема. Для получения правдоподобных результатов при наличии градиента скорости должно выполняться условие

$$\sigma \ll \frac{\bar{u}}{\nabla u},$$

где  $\frac{\bar{u}}{\nabla u}$  является характерной длиной течения;

$\sigma$  - расстояние от центра рассеивающего объема до его границы в направлении максимального градиента скорости.

Характеристики доплеровского сигнала зависят от размера рассеивающих частиц и их количества в исследуемой среде. Зависимость от размера рассеивающих частиц, определяемая их оптическими свойствами, углом пересечения падающих лучей, а также направлением наблюдения и апертурой приемной оптики, имеет довольно сложный характер [8]. При дифференциальной схеме отношение сигнала к шуму не зависит от концентрации частиц, если она находится в определенных пределах. При слишком малой концентрации начинают сказываться шумы фотоприемника и измерительной аппаратуры, при большой концентрации появляется эффект ослабления излучения в среде, влияющий на отношение сигнала к шуму.

## Экспериментальная часть

Опыты проводились на гидравлическом стенде, описанном в пособии [9], с помощью измерительного комплекса, описание которого приведено в источнике [1]. Измерялись составляющие скорости, расход, перепад давления и температура для стационарного турбулентного течения при  $Re = 280\ 000$ . Полученные и вычисленные данные сравнивались с литературными.

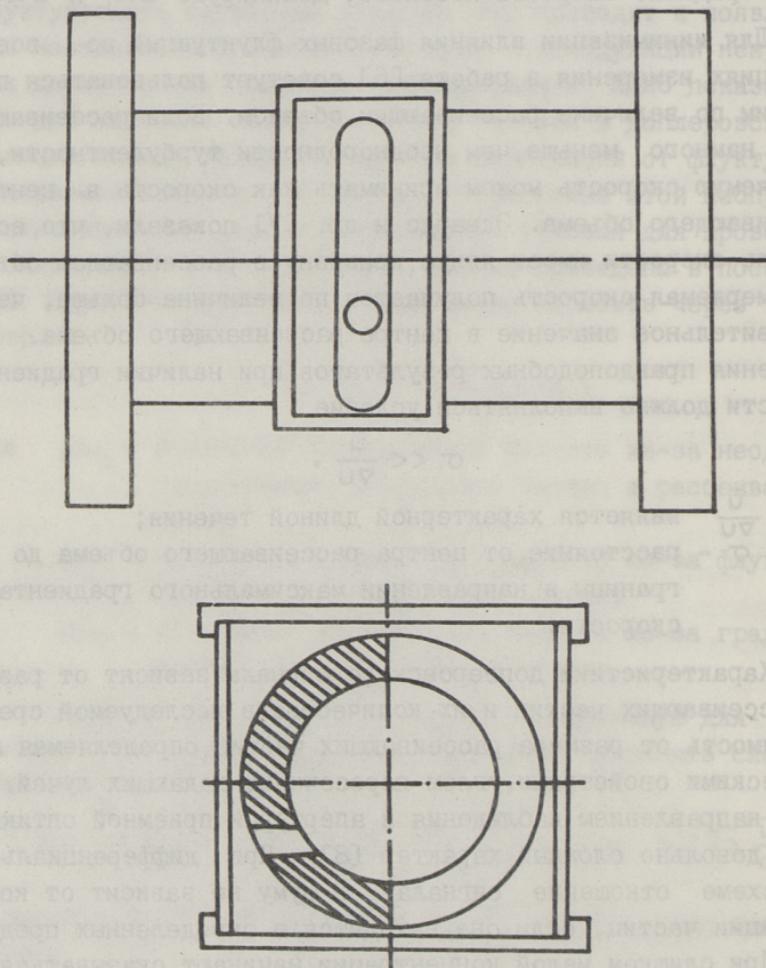


Рис. 4.

Для измерения двух компонент скорости в трубе была разработана и изготовлена специальная измерительная секция, представленная на рис. 4. Цилиндрическая часть секции выполнена из оргстекла, крепление плоскопараллельных

окон из нержавеющей стали. Из цилиндрической части секции вырезан сегмент (заштрихованная часть на рисунке 4 внизу). Для измерения радиальной компоненты скорости в это отверстие вставляются новые сегменты с отверстиями для прохождения лучей, составляющих измерительный объем. Количество вставляемых сегментов соответствует числу точек измерения по радиусу. Если биссектриса угла схождения лучей является перпендикулярной к плоскопараллельному окну из оптического стекла, то угол схождения лучей внутри измерительной секции определяется законом преломления и не меняется в процессе сканирования измерительного объема. Смещение измерительного объема тогда линейно зависит от перемещения фокусирующей линзы или исследуемой модели [10]:

$$\Delta z' = A \Delta z; \quad A = \left[ \frac{n^2 - \sin^2 \theta / 2}{1 - \sin^2 \theta / 2} \right]^{1/2}.$$

В литературе [10, 11] подробно описаны проблемы, связанные с дополнительной корректировкой по определению местоположения измерительного объема в трубе. В работах [12, 13] указываются пути для лишения влияния преломления с использованием жидкостей с показателем преломления, близким к показателю преломления стенок, изучаемой модели. На основе литературных данных можно делать вывод, что подобные жидкости в основном токсичные и относительно дорогие. Использование таких жидкостей затрудняется и тем обстоятельством, что их вязкость больше, чем у воды. Этим уменьшается верхний предел достигаемых на гидравлическом стенде числа Рейнольдса. Только раствор толуола и эфира лишен этого недостатка, но является токсичным и взрывоопасным.

Для получения непрерывного доплеровского сигнала в настоящем эксперименте в воду добавили окись титана с размерами частиц 0,5–0,8 мкм. Размеры частиц установили методом электронмикроскопии.

Для сканирования измерительного объема использовалось управляемое ЭВМ сканирующее устройство фокусирующей линзы. Величина наименьшего шага на сканирующем устройстве 0,1 мм.

Процессорами сигналов от двухкомпонентной ЛДИС использовались устройства следящего типа 57G20 фирмы "ДАНТЕК", Дания. Работа с таким процессором позволяет измерять непрерывный сигнал при довольно низком отношении сигнала на шум.

## Результаты измерений

При измерении проводилось сканирование измерительного объема от стенки до оси течения и обратно. В ядре потока шагом измерения было выбрано 5 мм, в пристенной части — 0,1 мм. Во время эксперимента параметров аппаратуру не меняли, проводилась только корректировка местоположения принимающей оптики в соответствии с изменением местоположения измерительного объема. Для стационарного турбулентного течения снимались данные в течение 9 секунд. Количество измерений для одной компоненты скорости 7124.

### 1. Профили скоростей

На рис. 5 изображен профиль измеренной продольной составляющей скорости вместе с профилем скоростей, вычисленных по логарифмическому закону

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{U_* y}{\nu} + 5,5.$$

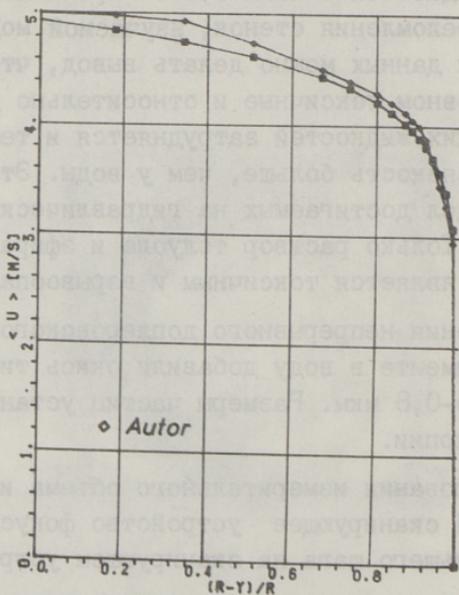


Рис. 5.

## 2. Профили интенсивностей турбулентности

На рис. 6 изображены результаты измеренных интенсивностей турбулентности, наряду с полученными из литературы [12, 15].

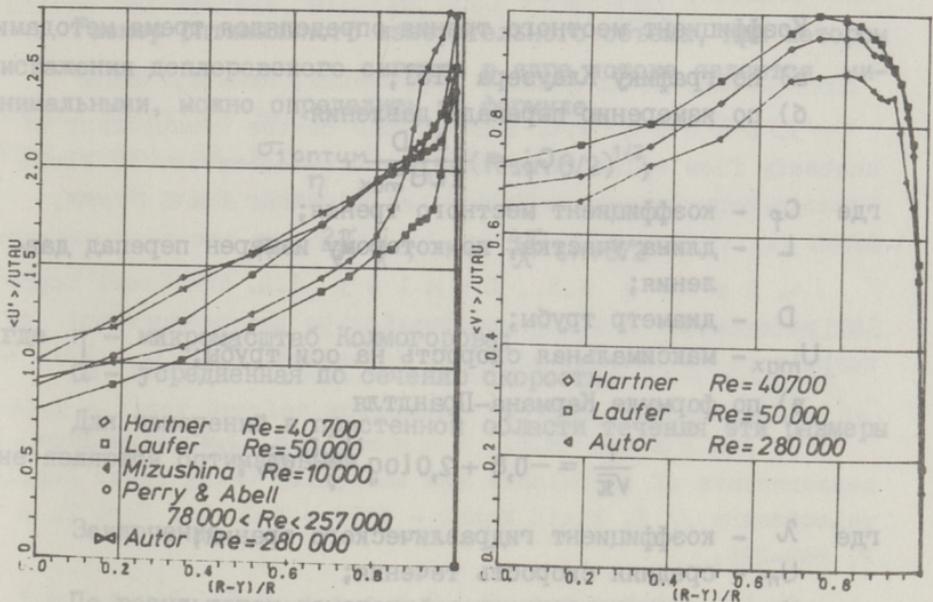


Рис. 6.

## 3. Расход потока

Расход потока измерялся с помощью индуктивного расходомера "Момент", калибровка которого осуществлялась объемным способом:

$$Q_p = \frac{P}{\rho \cdot t},$$

где  $P$  - вес жидкости;

$\rho$  - удельный вес жидкости;

$t$  - время.

Расход жидкости по измеренному профилю скорости, приведенному выше на рис. 5, определялся по формуле

$$Q_c = \int_0^r 2\pi r u dr.$$

Полученные данные приведены в таблице:

Re	$Q_p$	$Q_c$	Разность
280 000	0,0125	0,0132	0,0007

#### 4. Коэффициент местного трения

Коэффициент местного трения определялся тремя методами:

- по графику Клаузера [15];
- по измерению перепада давления

$$C_f = \frac{\Delta p D}{2 L U_{\max}^2},$$

где  $C_f$  - коэффициент местного трения;

$L$  - длина участка, по которому измерен перепад давления;

$D$  - диаметр трубы;

$U_{\max}$  - максимальная скорость на оси трубы;

- по формуле Кармана-Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,8 + 2,0 \log \frac{U_m D}{\nu} \sqrt{\lambda},$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;

$U_m$  - средняя скорость течения;

$\nu$  - кинематическая вязкость жидкости.

Результаты вычислений по этим трем методам имеют хорошую сходимость и показаны в таблице:

Re	Коэффициент местного трения		
	а	б	в
280 000	0,0024	0,00238	0,00253

#### 5. Оценка искажения доплеровского сигнала

Применяя теоретическую формулу и обозначения источника [3] вычислим отношения компонент, входящих в формулу величины искажения доплеровского сигнала. Результаты показаны в таблице:

	Ядро течения	Пограничный слой
$\frac{\Delta \omega_L}{\omega_0}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
$\frac{\Delta \omega_T}{\Delta \omega_L}$	$4,33 \cdot 10^{-3}$	6,58
$\frac{\Delta \omega_G}{\Delta \omega_T}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	0,31

Из таблицы видно, что в ядре потока искажения доплеровского сигнала из-за градиента скорости малы, большую роль играют искажения остальных членов. У стенки положение обратное - преобладают искажения, возникающие из-за наличия турбулентности и большого градиента скорости.

Размер оптимального измерительного объема, при котором искажения доплеровского сигнала в ядре потока являются минимальными, можно определить по формуле

$$\frac{\sigma_{1 \text{ оптум}}}{\eta} = 0,56 (R \sin \theta / 2)^{1/2};$$

$$R = \frac{2\pi \bar{u}}{\gamma K}; \quad K = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta / 2,$$

где  $\eta$  - микромасштаб Колмогорова;

$\bar{u}$  - усредненная по сечению скорость.

Для измерений в пристенной области течения эти размеры не являются оптимальными.

#### Заключение

По результатам измерений с помощью данного измерительного комплекса можно делать следующие выводы.

1. Измеренный профиль продольной составляющей скорости хорошо совпадает с вычисленным по логарифмическому закону.

2. Профиль интенсивности продольной и радиальной компонент вектора скорости довольно хорошо совпадают с известными из литературы.

3. Вычисленный по измеренному профилю продольной составляющей скорости расход жидкости хорошо совпадает с измеренным с помощью расходомера.

4. Вычисленные по измеренным данным и по разным методам коэффициенты местного трения хорошо сходятся.

5. Компоненты, составляющие величину искажения измеренного доплеровского сигнала, хорошо сходятся теоретическими рассуждениями

6. Измерительный комплекс является работоспособным.

7. Надо усовершенствовать методику измерения и обработки сигналов при измерении в пристенной области течения.

## Л и т е р а т у р а

1. Измерительный комплекс для изучения гидродинамических процессов при течении жидкости в трубе / Э.Г. Каск, Т.А. Коппель, А.А. Лепп, Р.Ю. Руубел, Л.Э. Сарв. (см. наст. сб., с. 81-88).
2. DISA, Laser Doppler Anemometry, August, 1983.
3. G e o r g W.K. Limitations on the measurement of unsteady flow velocities with laser velocimeter. // Fluid Dynamic Measurement. - Vol. 1. - Leicester Univ. Press, 1972.
4. G e o r g W.K., L u m l e y J.L. The laser Doppler velocimeter and its application to the measurement of turbulence // Journal of Fluid Mechanics. - 1973. - Vol. 60. - P. 321.
5. B e r m a n N.S., D u n n i n g J.W. Pipe flow measurements of turbulence and ambiguity using laser Doppler velocimetry // J. Fluid Mech. - 1973.- Vol. 61, Part 2. - P. 289-299.
6. B u c h h a v e P., G e o r g W.K., L u m l e y J.L. The measurement of turbulence with the laser Doppler anemometer // Ann. Rev. Fluid Mechanics. - 1979. - N 11. - P. 443-503.
7. E d w a r d s R.V., A n g u s J.C., D u n n i n g J.W. Spectral analyses of the signal from the laser Doppler velocimeter: turbulent flows // Journal of Applied Physics. - 1973. - Vol. 44. - P. 1694.
8. Д у б н и щ е в Ю.Н., Р и н к е в и ч ю с Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. - М.: Наука, 1982.
9. Л и й в У.Р. Экспериментальное исследование гидравлических характеристик потока жидкости в трубах / Изд. АН СССР // Водные ресурсы.-1981. - № 3. - С. 139-145.
10. Т и м о ф е е в А.С. Особенности измерения вектора скорости потоков в осесимметрических моделях лазерным анемометром // Теплофизика высоких температур.-1982.-Т. 20. - № 5. - С. 951-957.

11. Broadway J.D., Karahan E. Correction of laser Doppler anemometer readings for refraction at cylindrical interfaces // DISA Information, Measurement and Analysis. - 1981. - 26.

12. Hartner E. Turbulenzmessung in pulsierender Rohrströmung: Doktor-Ingenieurs Dissertation. - Technische Universität, München, 1984. - S. 136.

13. Heidriks F., Aviram A. Use of zinc iodide solutions in flow research // Rev. Sci. Instrum. - 1982. - Vol. 53, N 1. - P. 75-78.

14. Clauser F.H. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients // Journal of Aeronautical Sciences. Feb., 1954.

15. Хинце И.О. Турбулентность - М.: Физматгиз, 1963.

16. Bates C.S. Experimental pipe flow analyses using a laser Doppler anemometer // DISA Information. - July, 1974. - N 16. - P. 5-10.

R. Ruubel

The Measurement of Steady Pipe Flow  
Using a Laser Doppler Anemometer

Abstract

Basic principles of Laser Doppler Anemometry are given with recommendations for measurement with two-component Laser Doppler Anemometer in turbulent flows. Results and calculations of measurement with a new measuring system are given.



ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ УСКОРЕННОМ  
ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

Нестационарный пограничный слой исследуется в настоящее время очень активно. Эти исследования составляют часть из общих усилий, направленных на достижение полного понимания нестационарного течения, на умение рассчитывать эти течения, а также применение результатов исследований в технике. Область применения результатов исследований очень широка, например, снижение сопротивления плавательных и летательных аппаратов, улучшение теплопроводности в установках охлаждения и т.д.

В настоящее время самые подробные исследования нестационарного пограничного слоя проведены на плоской пластине [1, 2, 3]. В этих исследованиях хорошо заметен переход ламинарного режима течения в турбулентный.

Часто предполагается, что развитие пограничного слоя в трубе аналогично развитию этого же слоя на плоской пластине. Так же довольно часто считается, что максимальная скорость в сечении трубы и скорость в пограничном слое увеличиваются постепенно до тех пор, пока пограничный слой простирается до оси трубы. Однако в действительности развитие течения в трубе протекает сложнее.

Предыдущие исследования в области нестационарного течения показали, что возникновение турбулентности в трубе происходит вблизи стенки [4, 5, 6, 7]. После этого происходит распространение турбулентности в сторону оси трубы. Визуализация процесса разгонного течения подтверждает эти наблюдения.

Эксперименты проводились на опытной установке (рис. 1), состоящей из следующих основных частей: 1 - напорный бак; 2 - рабочая труба; 3 - быстродействующий клапан; 4 - установка для впуска краски в трубу; 5 - две кинокамеры, работающие синхронно; 6 - бак слива; 7 - светильники дневного света длиной 1 м вместе с экраном. Рабочей жидкостью была использована водопроводная вода. Стекло́нная труба (длина 6 м, внутренний диаметр 50 мм) имеет конусный вход, который гарантирует невозмущенное течение жидкости в трубу.

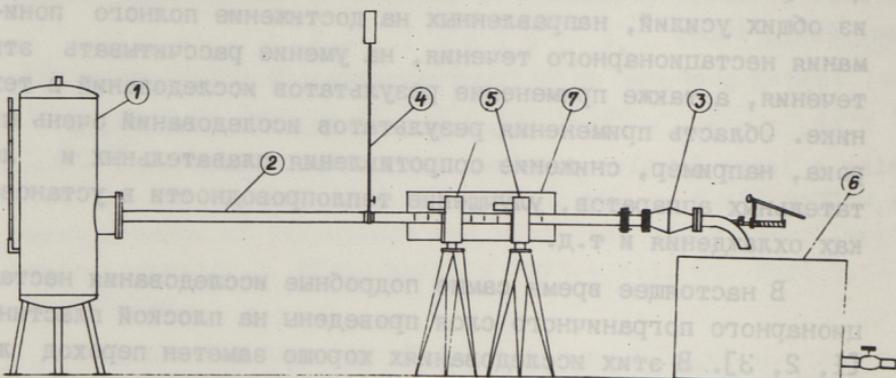


Рис. 1. Опытная установка.

Водяной раствор перманганата калия впускается в трубу через тонкую трубку при малой скорости течения рабочей жидкости. Это обеспечивает существование тонкого слоя краски на дне рабочей трубы по всей длине. Изменение начальной высоты уровня воды в напорном баке позволяет получить разные ускорения жидкости при открытии клапана в конце трубы. Опыты проводились соответственно при высоте уровня воды в напорном баке 40, 50, 60 и 75 см.

### Результаты исследований

Целью работы было визуализирование процессов генерации турбулентности, особенно в пограничном слое, происходящих при разгоне жидкости из состояния покоя. На рис. 2 при-



Рис. 2. Кинограмма процесса турбулизации в трубе. Стрелками указано возникновение вихревых структур и их перемещение по направлению течения.

ведены кинограммы, полученные при съемке процесса турбулизации пограничного слоя. Результаты определения средней скорости показывают, что процесс генерации турбулентности начинается в некоторой дальности от начала трубы при мгновенном числе Рейнольдса, значительно превышающем  $Re_{кр}$  стационарных потоков, достигая в данном случае до 65 000.

Кинограммы показывают, что при ускорении потока в пограничном слое имеет место волнообразный характер течения, который был замечен и в работе [8]. В момент изменения режима течения вблизи стенки образуются вихревые структуры большой интенсивности, которые расширяются как по длине, так и по радиусу трубы и двигаются вниз по направлению течения. Вихревые структуры возникают с некоторым шагом, длина которого не имеет постоянной величины, а, очевидно, зависит от многих факторов (диаметра труба, ускорения и т. д.). Например, в трубе с диаметром 34 мм при начальном напоре в баке 0,5 м  $H_2O$  шаг вихревых структур, или другими словами, "пристеночной волны" составлял 0,25 м, а в трубе диаметром 50 мм шаг был в пределах от 0,5 до 1,0 м. Однако нужно отметить, что в отдельных опытах в месте волнообразного характера возникновения турбулентности была зарегистрирована одновременная турбулизация пограничного слоя по всей длине трубы.

В работе [9] подробно исследованы движения когерентных турбулентных структур в цилиндрической трубе при стационарном течении. Характерным для этих структур является то, что скорость фронта структуры больше, а скорость задней части структуры меньше, чем средняя скорость движения. Поэтому когерентные структуры по размерам увеличиваются. Таким же образом после возникновения ведут себя структуры пограничного слоя, увеличиваясь по длине и по радиусу трубы.

На основе исследований с двумя термоанемометрическими датчиками было выявлено, что турбулизация поперечного сечения происходит не с постоянной скоростью, причем хорошо различимы слои почти мгновенной турбулизации потока и слои с более медленной скоростью турбулизации [6]. Результаты визуализации подтверждают это явление. При движении вниз по течению турбулентные структуры увеличиваются по размерам, и при их проходе через фиксированное сечение регистрируется вышеназванная картина турбулизации поперечного сечения трубы.

### Заключение

Результаты визуализации пограничного слоя разгонного течения из состояния покоя в цилиндрической трубе еще раз подтверждают, что профиль скорости остается равномерным до перехода в турбулентный режим и критическое число Рейнольдса значительно превышает  $Re_{кр}$  стационарных потоков. В большем количестве опытов возникновение турбулентности характеризуется низкочастотным волнистым процессом, т.е. по длине трубы с определенным шагом возникают турбулентные структуры. Эти структуры увеличиваются по размерам и двигаются вниз по течению, до полной турбулизации потока.

### Л и т е р а т у р а

1. Ш л и х т и н г Г. Возникновение турбулентности. - М.: ИЛ, 1962. - С. 204.
2. Б а б е н к о В.В. Экспериментальное исследование возникновения турбулентности. Бионика // Респ. межвед. сб. Т.И., 1977. - С. 50-58.

3. М и л л е р Р.В., Х э н Л.С. Интегральный метод анализа неустановившегося ламинарного течения в пограничном слое // Теоретические основы инженерных расчетов. - 1973. - № 2. - С. 141-154.

4. А й н о л а Л.Я., К о п п е л ь Т.А., Л а м п Ю.Ю. Л и й в У.Р. Исследование локальных скоростей при разгонном движении жидкости из состояния покоя в трубе // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1979. - № 472. - С. 35-43.

5. Л а м п Ю.Ю. Смена режимов течения жидкости при ускоренном движении // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1983. - № 544. - С. 63-67.

6. Д а н и э л ь Э.Н., К о п п е л ь Т.А. Процесс турбулизации потока при ускорении жидкости в цилиндрической трубе // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1985. - № 593. - С. 109-122.

7. К а с к Э.Г. Экспериментальное исследование распределения скоростей по живому сечению при возникновении движения жидкости в трубопроводе // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1980. - № 485. - С. 23-28.

8. К а с к Э.Г., К о п п е л ь Т.А. Изучение нестационарного течения жидкости в трубе методом визуализации // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1983. - № 544. - С. 55-62.

9. W y g n a n s k i I.J., C h a m p a g n e F.H. On transition in a pipe. Part 1. The origin of puffs and slug and the flow of a turbulent slug // J. Fluid Mech. - 1973. - V. 59. - P. 281-335.

то примет вид, т.е. решение (1)-(4) относительно  $u(x,t)$ , будет представлять собой смешанную задачу для уравнения с частными производными параболического типа. В источнике [3] показано, что она имеет единственное решение в пространстве  $W_1$ :

$$W = \{w | w \in L_2(0, T; V), dw/dt \in L_2(0, T; V')\}$$

$$V = \{v | v_x^2 \in L_{loc}^1(0, 1), x^2 v \in L_{loc}^1(0, 1), xv^2 \in L_2(0, 1), xv^2 \in L_2(0, 1), v(1) = 0\},$$

где  $L_{loc}^1$  есть пространство локально интегрируемых функций на  $(0, 1)$ .

Там же была сформулирована обратная задача, т.е. за-

E. Kask, T. Koppel

The Visualization of the Boundary Layer at the Accelerated Fluid Flow in Pipes

Abstract

The article presents the results of the visualization of the unsteady boundary layer of the pipe flow at different pipe diameters. The process of the turbulization of the boundary layer was fixed on the film by two synchronously working cameras. An analysis of the results and comparison with the previous results are given.

Литература

1. Г. В. Карман. Турбулентность. - М.: Физматгиз, 1976. - С. 204.
2. В. В. Карман. Экспериментальное исследование турбулентности. Докл. Акад. наук СССР, 1935. - С. 50-58.

А.Ю. Тийман

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОДНОЙ  
ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГИДРОДИНАМИКИ

## Формулировка задачи

Используя модель Васильева-Квона [3] после многочисленных предположений и упрощений уравнение движения несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе приобретает вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (x \alpha(x) \frac{\partial u}{\partial x}) = 1, \quad x \in (0,1), t \in [0,T]. \quad (1)$$

Это уравнение описывает стационарное турбулентное течение, где коэффициент  $\alpha(x)$  имеет физический смысл, как сумма молекулярной и турбулентной вязкости жидкости. Если для уравнения (1) задать начальные и граничные условия

$$u(x, 0) = 0, \quad x \in (0,1), \quad (2)$$

$$u(1, t) = 0, \quad t \in [0,T], \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0, \quad t \in [0,T], \quad (4)$$

то прямая задача, т.е. решение (1)-(4) относительно  $u(x,t)$ , будет представлять собой смешанную задачу для уравнения с частными производными параболического типа. В источнике [3] показано, что она имеет единственное решение в пространстве  $W$ :

$$W = \{w | w \in L_2(0,T;V), dw/dt \in L_2(0,T;V')\}$$

$$V = \{v | x^{\frac{1}{2}}v \in L^1_{loc}(0,1), x^{\frac{1}{2}}v' \in L^1_{loc}(0,1), xv^2 \in L_2(0,1), xv'^2 \in L_2(0,1), v(1)=0\},$$

где  $L^1_{loc}$  есть пространство локально интегрируемых функций на  $(0,1)$ .

Там же была сформулирована обратная задача, т.е. за-

дача отыскания коэффициента  $a(x)$ , если на множестве решений прямой задачи задан оператор "наблюдения"  $Cu \equiv \int_0^1 u x dx$ , значения которого известны. Эта проблема идентификации была поставлена как задача оптимального управления, т.е. надо определить минимизирующий элемент функционала

$$J(a) = \|Cu(x, t; a) - \varphi(t)\|_{L_2(0, T)}^2, \quad (5)$$

если  $a(x) \in M = \{b(x) | b(x) \in L_\infty(0, 1), b(x) \geq b_0 > 0, x \in [0, 1]\}$ .

Минимизацию можно провести градиентными методами, т.е.

$$a^{(i+1)} = a^{(i)} - \lambda_i J'(a^{(i)}), \quad (6)$$

где  $a^{(i)}$  - приближение функции  $a(x)$  решения задачи (5) на  $i$ -ом шаге итерации.

Для этого было найдено выражение градиента функционала  $J(a)$  в пространстве  $L_2(0, 1)$  (также см. [3]):

$$J'(a) = x \int_0^T u'_x p'_x dt,$$

где  $p(x, t, a)$  - решение сопряженной к (I)-(4) задачи:

$$-\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (x a(x) \frac{\partial p}{\partial x}) = -2 \left( \int_0^1 u x dx - \varphi \right), \quad (7)$$

$$p(x, T) = 0, \quad x \in (0, 1), \quad (8)$$

$$p(1, t) = 0, \quad t \in [0, T], \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(0, t) = 0, \quad t \in [0, T]. \quad (10)$$

Здесь  $\varphi(t)$  - заданный элемент пространства  $L_2(0, T)$ , а коэффициент  $a(x)$  тот же, что и в прямой задаче (I)-(4).

Таким образом, для определения очередного приближения  $a^{(i)}$  в формуле (6) надо один раз решить прямую задачу и один раз ей сопряженную, которая также имеет единственное решение (см. [3]).

#### Методы вычислений

Прямая (а так же сопряженная) задача решается методом Кранка-Никольсона-Галёркина (см. [2]), т.е. решение находится в виде

$$U(x, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \varphi_i(x),$$

где базисные функции  $\varphi_i(x)$ , ( $i=1, \dots, N$ ) являются кусочно-линейными функциями вида

$$\varphi_0(x) = \begin{cases} \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} & (x_0 \leq x \leq x_1) \\ 0 & (x_1 \leq x \leq x_n) \end{cases}$$

$$\varphi_i(x) = \begin{cases} 0 & (x_0 \leq x \leq x_{i-1}) \\ \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} & (x_{i-1} \leq x \leq x_i) \\ \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} & (x_i \leq x \leq x_{i+1}) \\ 0 & (x_{i+1} \leq x \leq x_n) \end{cases}$$

$$\varphi_n(x) = \begin{cases} 0 & (x_0 \leq x \leq x_{n-1}) \\ \frac{x - x_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} & (x_{n-1} \leq x \leq x_n). \end{cases}$$

Аппроксимация Галёркина дает нам систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно функций  $\alpha_i(t)$  ( $i=1, \dots, N$ )

$$B \dot{\vec{\alpha}} + C \vec{\alpha} = \vec{b},$$

которая заменяется системой разностных уравнений

$$B \left( \frac{\vec{\alpha}_{n+1} - \vec{\alpha}_n}{\Delta t} \right) + C \left( \frac{\vec{\alpha}_{n+1} + \vec{\alpha}_n}{2} \right) = \vec{b} \left( \tau_{n+\frac{1}{2}} \right), \quad n=0, 1, \dots,$$

где  $\vec{\alpha}_n$  аппроксимирует  $\vec{\alpha}(t_0 + n\Delta t)$  и  $\tau_{n+\frac{1}{2}} = t_0 + (n+\frac{1}{2})\Delta t$  (этот метод часто называют методом трапеции).

Получаемая система алгебраических уравнений решается методом Чолеского. Надо заметить, что матрицы прямой и сопряженной задачи совпадают.

### Примеры

В качестве иллюстрации приведем результаты решений для двух модельных задач. Обе задачи решены на ЭВМ ЕС1060. Для первой понадобилось 78 минут процессорного времени, для второй - 57. Интервал  $(0, I)$  был разбит на 20 частей с постоянным шагом  $h = I/20$ ; временной интервал был разбит на 25 частей с шагом  $h_1 = 0, I$ . Коэффициент в итерации (6) вычислялся по принципу монотонности, т.е. критерием выбора

нужного значения для  $\lambda_i$  являлось неравенство

$$J(a^{(i+1)}) < J(a^{(i)}),$$

где  $i$  - номер итерации (был использован и метод наискорейшего спуска, но ввиду очень медленной сходимости в дальнейшем не использован).

Остановка процесса вычислений была в обоих примерах произведена после выполнения неравенства  $|J(a^{(i-1)}) - J(a^{(i)})| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon = 0,1 \cdot 10^{-14}$ .

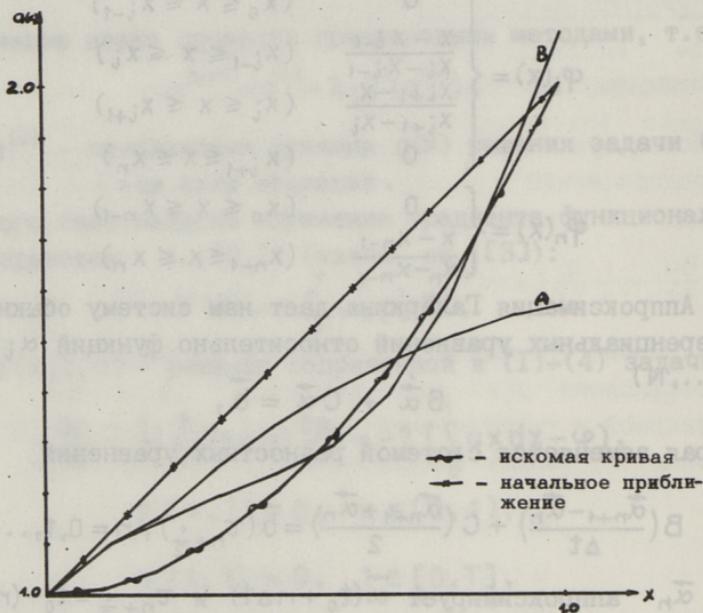


Рис. 1.

В первом примере в качестве идентифицируемого коэффициента была взята функция  $a(x) = x^2 + 1$ , за начальное приближение - функция  $a_0(x) = x + 1$ . Надо заметить, что начальное приближение выбиралось из условия  $a_0(x)|_{x=0} = a(x)|_{x=0}$ . Это сделано из предположения, что, поскольку коэффициент  $a(x)$  физический, означает сумму молекулярной и турбулентной вязкости, то вдоль оси трубы (где  $x = 0$ ) мы можем рассчитывать только на молекулярную вязкость, которая нам известна. На рисунке I приведены результаты вычислений. Кривая A соответствует результату первой итерации, кривая B - решению

задачи после 914 итерации. Ошибка результата, т.е.

$\|a(x) - a_{914}(x)\|_{L_2(0,1)}$  равнялась при этом 0,0569.

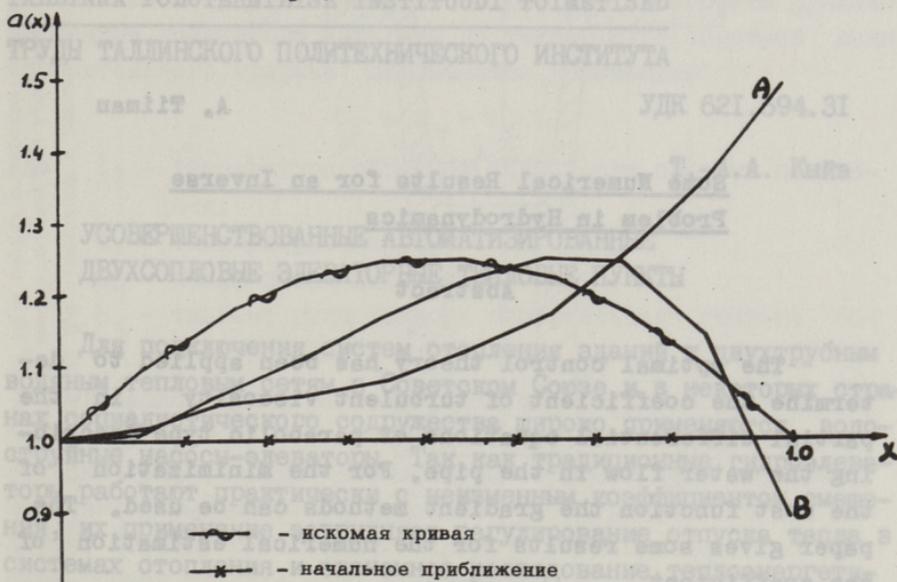


Рис. 2.

Во втором примере идентифицировалась функция  $a(x) = -x^2 + x + 1$ , за начальное приближение была взята функция  $a_0(x) = 1$ . Результаты приведены на рисунке 2, где кривая А соответствует первой итерации, кривая В - полученному результату после 837 итерации. Ошибка в этом примере равнялась 0,0838.

#### Л и т е р а т у р а

1. Васильев О.Ф., Квон В.И. Неустановившееся турбулентное течение в трубе / Изв. АН СССР // Журнал прикладной механики и технической физики. - 1971. - № 6. - С. 132-140.

2. Митчелл Э., Уэйт Р. Методы конечных элементов для уравнений с частными производными. - М., 1981.

3. Тийман А.Ю. О вычислении градиента функции стоимости для одной обратной задачи // Уч. зап. Тартуского гос. ун-та. - 1985. - Вып. 715. - С. 30-36.



### УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ДВУХСОПЛОВЫЕ ЭЛЕВАТОРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПУНКТЫ

Для подключения систем отопления зданий к двухтрубным водяным тепловым сетям в Советском Союзе и в некоторых странах социалистического содружества широко применяются водоструйные насосы-элеваторы. Так как традиционные гидроэлеваторы работают практически с неизменным коэффициентом смешения, их применение затрудняет регулирование отпуска тепла в системах отопления и экономное расходование теплоэнергетических ресурсов, особенно в переходное время отопительного сезона. Для ликвидации указанных недостатков разработаны новые регулируемые гидроэлеваторы, из которых наиболее известны так называемый элеватор с иглой и двухсопловой элеватор [1].

Разработанная в Таллинском политехническом институте новая конструкция двухсопловой элеваторного узла [2] позволяет значительно улучшить его наладку. Достигается это тем, что в элеваторном узле (рис. 1) держатель базового сопла снабжен винтовой направляющей и хвостовиком, на продольных направляющих которого установлен диск, по его периметру выполнены глухие отверстия для поворота. Наладка нового элеваторного узла осуществляется следующим образом. Ослабляя фланцы 10 поворачиванием диска 12, возможно продольное смещение базового сопла 2, что изменяет выходное сечение базового сопла и расход сетевой воды через элеваторный узел. Тем самым возможна более точная установка требуемого коэффициента смешения для элеваторного узла. Таким образом упрощается и уточняется наладка элеваторного узла, не требуется многократный демонтаж и монтаж его, изготовление и замена базового сопла, чем сопровождается повышение качества отопления.

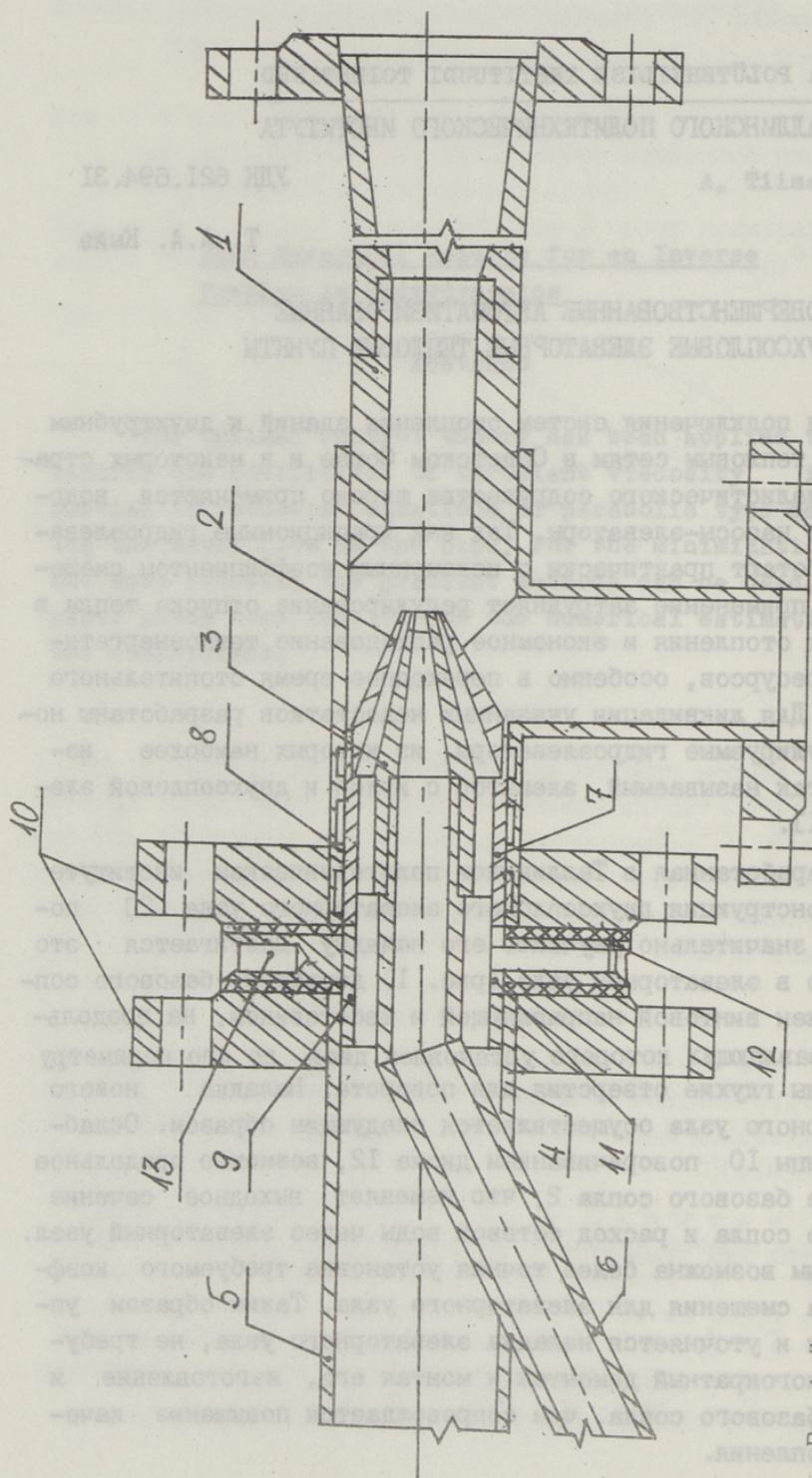


Рис. 1. Двухсопловой элеваторный узел:

1 - корпус элеватора; 2 - базовое сопло; 3 - дополнительное сопло; 4 - тройник; 5,6 - основной и дополнительный трубопроводы прямой сетевой воды; 7 - держатель базового сопла; 8 - винтовые направляющие; 9 - хвостовик; 10 - фланцы корпуса элеватора и тройника; 11 - продольные направляющие; 12 - диск; 13 - глухие отверстия для поворота.

Принципиальная схема усовершенствованного двухсплового теплового пункта приведена на рис. 2, а алгоритм функционирования командного аппарата по температуре обратной воды "отопительного графика" описывается уравнением

$$t_2 = a_n - b_y \cdot t_n,$$

где  $t_2$  - температура обратной воды после системы отопления;

$t_n$  - температура наружного воздуха;

$a_n$  - коэффициент настройки;

$b_y$  - тангенс угла наклона отопительного графика обратной воды.

Тепловой пункт работает следующим образом. В теплые периоды отопительного сезона, а также в периоды снижения отпуска тепла, когда температура обратной воды завышена, исполнительный механизм основного регулирующего органа получает команду от командоаппарата, и он закрывается, а подача прямой сетевой воды в двухсплоевой элеватор осуществляется только через дополнительный трубопровод, дополнительный регулирующий орган и дополнительное сопло. В этом случае снижение температуры и сохранение необходимого расхода теплоносителя в системе отопления обеспечивается за счет работы элеватора с повышенным коэффициентом смешения. Если, несмотря на выключение базового сопла элеватора, температура обратной воды останется завышенной, командный аппарат подает команду исполнительному механизму дополнительного регулирующего органа, и он закрывается. Таким образом система отопления выключается. Когда температура обратной воды оказывается ниже установленной, командоаппарат сначала открывает дополнительный регулирующий орган и подключает в работу дополнительное сопло элеватора. Если при работе только дополнительного сопла температура обратной воды оказывается заниженной командоаппаратом, открывается и основной регулирующий орган и подключается в работу базовое сопло элеватора, устанавливается расчетный режим. Возможно применить вариант регулирования по температуре внутреннего воздуха.

Таким образом усовершенствованный автоматизированный двухсплоевой элеваторный тепловой пункт обеспечивает диапазон регулирования от 0 до 100 % (от расчетного режима до

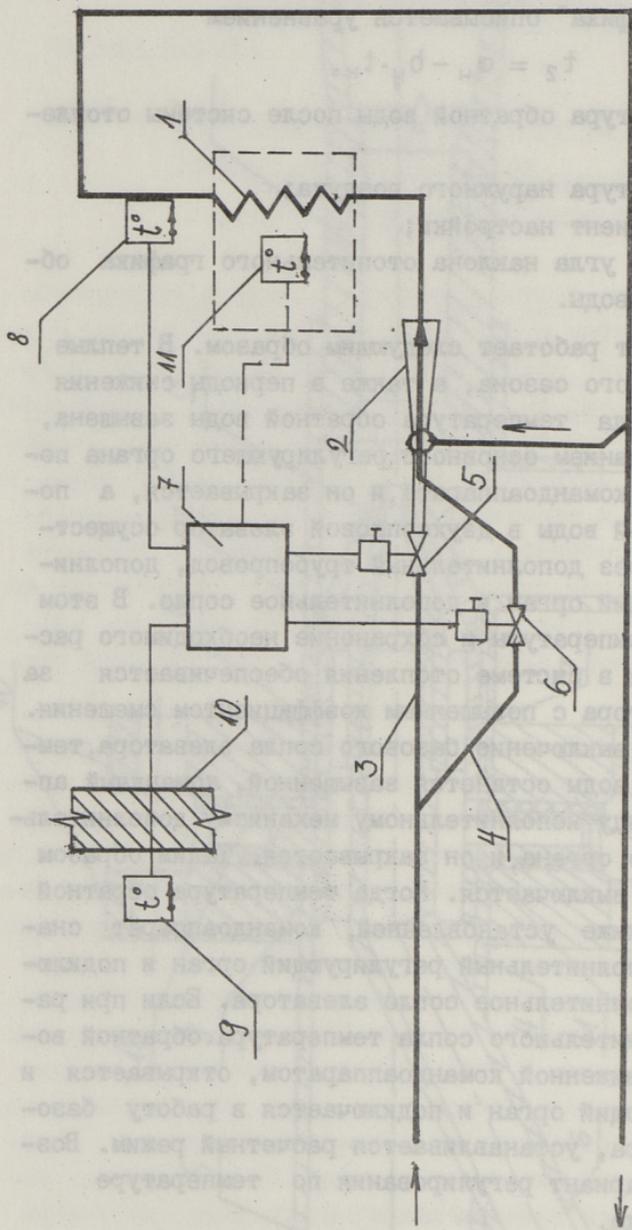


Рис. 2. Принципиальная схема усовершенствованного автоматизированного двух-  
 соплового теплового пункта:  
 1 - система отопления; 2 - двухсплоевой элеватор; 3,4 - основной и  
 дополнительный трубопроводы прямой сетевой воды; 5,6 - основной и  
 дополнительный регулирующие органы с исполнительными механизмами;  
 7 - командоаппарат; 8,9 - датчики температуры обратной воды и на-  
 ружного воздуха; 10 - наружная стена здания; 11 - датчик температу-  
 ры внутреннего воздуха.

выключения системы отопления). При этом, как показали исследования, гидравлическая и тепловая устойчивость системы отопления обеспечивается во всем диапазоне регулирования, а работа с пропусками происходит только при высоких температурах.

2-15.05.65. Ред. № 101

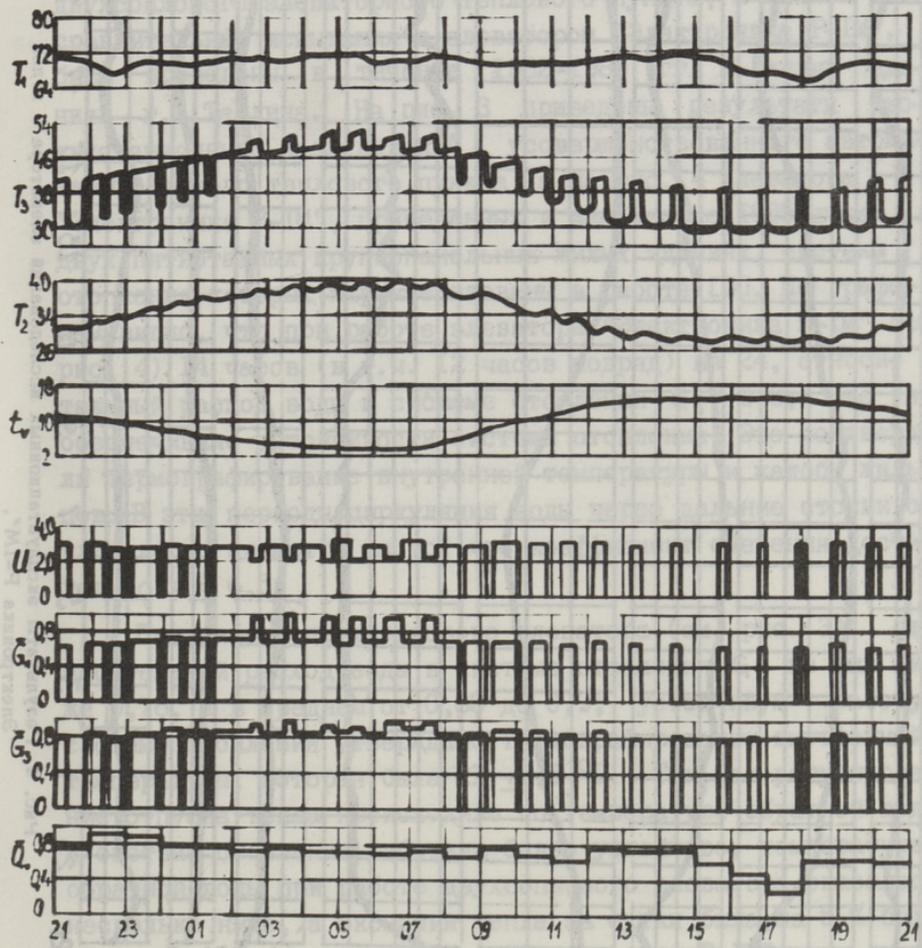


Рис. 3. Результаты эксплуатационных исследований усовершенствованного автоматизированного двухсплошного элеваторного теплового пункта.

Вывод: сравнение элеватора с классической автоматикой P-IM имеет ряд преимуществ, а именно:

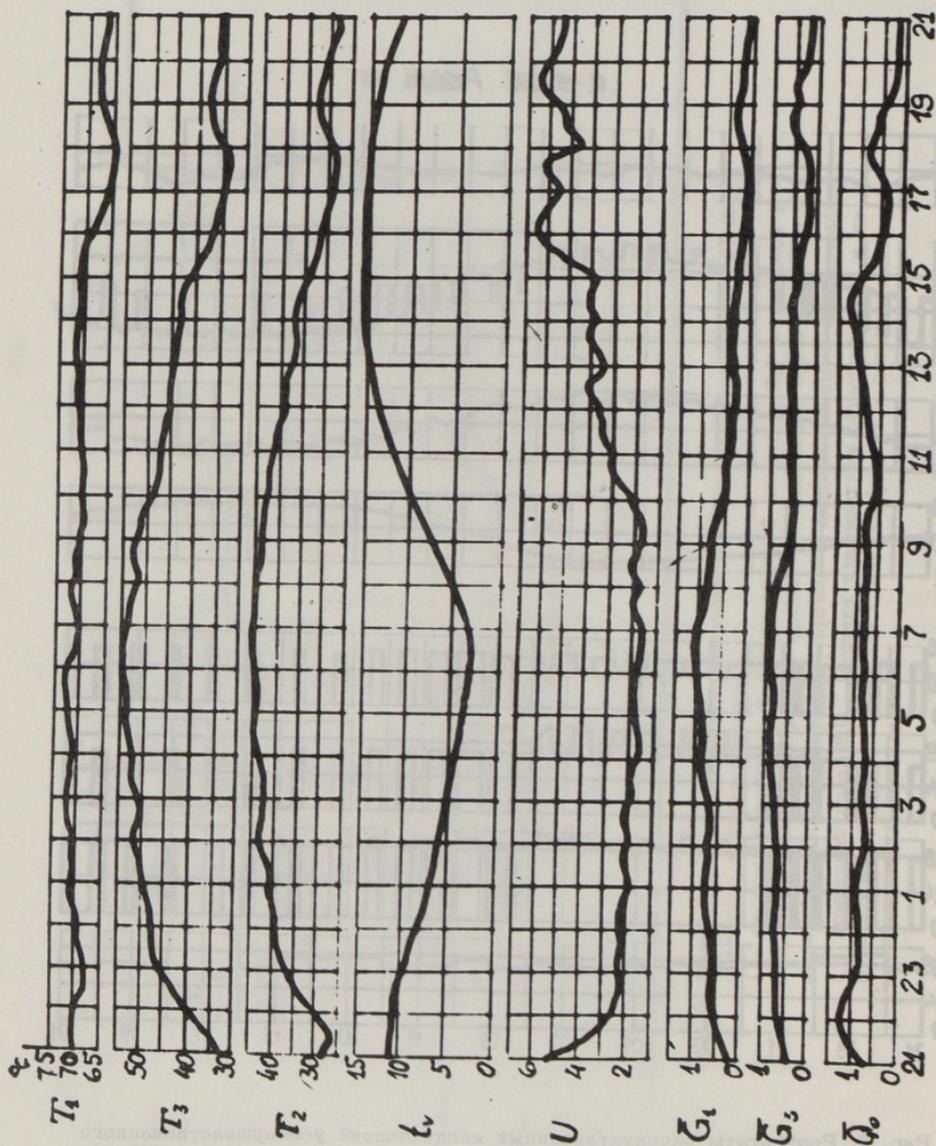


Рис. 4. Результаты эксплуатационных исследований элеватора с иглой "Электроника Р-1М".

выключения системы отопления). При этом, как показали исследования, гидравлическая и тепловая устойчивость системы отопления обеспечивается во всем диапазоне регулирования, а работа с пропусками происходит только при высоких температурах наружного воздуха, когда  $t_n > 6$  °С.

Исследования усовершенствованного автоматизированного двухсплового элеваторного теплового пункта, а также его сравнительные испытания с элеватором "Электроника Р-ИМ", были проведены в течение 1982-1985 гг. в жилых зданиях г. Таллина. На рис. 3 приведены результаты эксплуатационных исследований усовершенствованного автоматизированного теплового пункта, а на рис. 4 элеватора "Электроника Р-ИМ", проведенных в мае месяце 1985 года в двух пятиэтажных крупнопанельных жилых зданиях, системы отопления которых характеризованы в работе [3]. По графикам видно, что при работе элеватора "Электроника Р-ИМ" (см. рис. 4) 14 часов (в т.ч. 12 часов подряд) из 24, относительный расход воды в системе отопления  $G_3 > 0,6$ , что не обеспечивало устойчивости системы отопления. Это подтвердили термографирование внутренней температуры и жалобы жильцов. В эти периоды циркуляция воды через дальние стояки отключалась, несмотря на то, что коэффициент смешения достигал до  $\mu = 6,5$ .

При работе двухсплового элеватора (см. рис. 3) относительный расход воды в системе отопления  $G_3$  не был ниже 0,76, а в среднем от 0,85 до 0,9; устойчивую работу системы отопления утверждало термографирование внутренней температуры, которая была  $2t \pm 0,5$  °С. Так как регулирование отпуска тепла происходило по температуре обратной воды, а система отопления работала более устойчиво, температура обратной воды при работе двухсплового элеватора оказалась несколько ниже, а экономия тепла за сутки была на 5 % больше по сравнению с элеватором "Электроника Р-ИМ".

На основе исследований можно сделать вывод, что усовершенствованный автоматизированный двухсплового элеваторный тепловой пункт (по сравнению элеватора с иглой "Электроника Р-ИМ") имеет ряд преимуществ, а именно:

- значительно выше устойчивость системы отопления при малых отопительных нагрузках (когда температура наружного воздуха выше температуры излома "отопительного" графика);
- точнее наладка элеваторного узла;
- при работе только дополнительного сопла двухсоплового элеватора коэффициент скорости  $\varphi_1$  значительно выше, чем у элеватора с иглой при таком же режиме;
- регулирование по температуре обратной воды (косвенный учет влияния ветра и внутренних тепловыделений);
- применение линейных датчиков температуры (медные термометры сопротивления);
- более подходящие для существующих тепловых пунктов, так как не требуют переустановки трубопроводов при монтаже;
- больше экономия тепловой энергии;
- отсутствие уплотняющих сальников штоков регулирующих органов при применении мембранных соленоидных вентилей в качестве регулирующих органов.

Экономия теплоэнергетических ресурсов от внедрения усовершенствованных автоматизированных элеваторных тепловых пунктов составляет до 20 % в зависимости от абонентов.

### Л и т е р а т у р а

1. А.с. № 606036 (СССР). Элеваторный узел / Т.-А.А. Кыйв, В.Г. Драчнев. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 17.
2. А.с. № 1153198 (СССР). Элеваторный узел / Т.-А.А. Кыйв. - Оpubл. в Б.И., 1985, № 16.
3. Кыйв Т.-А.А. Сравнительные испытания регулируемых гидроэлеваторов // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. - 1984. - № 569. - С. 71-75.

12. А.Б. Тейман. Некоторые результаты исследования  
Содержание  
ния одного обратного цикла контактного..... 123

13. Л.Т. Прохорова. Принципы построения математической  
модели гидромеханических систем..... 124

Т.-А. К81v

15. The New Automatic Two-nozzle Jet Pump  
Heating Unit  
3. А.А. Ляко, В.П. Ляко, В.А. Рудель..... 125

Abstract

In the article the construction of the new two-  
nozzle jet pump and the new automatic two-nozzle heat-  
ing unit are represented. The results of the compari-  
son of the new automatic two-nozzle jet pump heating  
unit and the needle-type jet pump heating unit are  
presented.

6. В.Н. Рудель. Интегральные уравнения для  
составления кинематической системы..... 126

7. Л.Р. Арнольд, В.П. Ляко, В.А. Рудель. Нелинейные  
тепловые колебания в гидродинамических трубах..... 127

8. В.Л. Масок, Т.А. Коппель, А.А. Ляко, В.А. Рудель,  
Л.С. Сорок. Нестационарный комплекс для изучения  
гидродинамических процессов при тепловых колебаниях  
в трубах..... 128

9. В.Н. Ляко, В.А. Рудель. Взаимное влияние для  
колебания нестационарных тепловых колебаний и  
тепловых тел в трубах..... 129

10. В.А. Рудель. Измерение параметров стационарного  
тепловых колебаний в трубах с помощью лазерного ме-  
теодика скорости..... 130

11. В.Л. Масок, Т.А. Коппель. Взаимное влияние  
колебаний при тепловых колебаниях в трубах..... 131

## С о д е р ж а н и е

I.	Г.Т. Гроссшмидт. Принципы построения математических моделей гидромеханических цепных систем. . .	3
2.	Ю.И. Ванавески. Составление блок-схем гидромеханических систем из многополюсных моделей функциональных элементов.....	15
3.	Э.А. Пайс, Ю.И. Ванавески. Построение математических моделей итерационного расчета переходных характеристик элементов гидромеханических систем..	29
4.	Я.А. Пахапилль. Построение вычислительных моделей функциональных элементов гидромеханических систем.....	37
5.	Я.А. Пахапилль, Г.Т. Гроссшмидт. Пакет программ для моделирования гидромеханических систем.....	47
6.	В.И. Реэдик. Пневматические струйные датчики с отражением кольцевой струи для очувствления робототехнических систем.....	57
7.	Л.Я. Айнола, У.Р. Лийв, Э.А. Руустал. Импульсные течения несжимаемой жидкости в напорных трубах..	67
8.	Э.Г. Каск, Т.А. Коппель, А.А. Лепп, Р.Ю. Руубел, Л.Э. Сарв. Измерительный комплекс для изучения гидродинамических процессов при течении жидкости в трубе.....	81
9.	Э.Н. Даниэль. Лазерный измеритель скорости для измерения нестационарных течений жидкости и твердых тел в трубе.....	89
10.	Р.Ю. Руубел. Измерение параметров стационарного течения жидкости в трубе с помощью лазерного измерителя скорости.....	101
II.	Э.Г. Каск, Т.А. Коппель. Визуализация пограничного слоя при ускоренном движении жидкости в трубе.....	117

12. А.Ю. Тийман. Некоторые результаты численного решения одной обратной задачи гидродинамики..... 123
13. Т.-А.А. Кыйв. Усовершенствованные автоматизированные двухсплошные элеваторные тепловые пункты..... 129







EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00082368 6

**Цена 1.50**