

М401907

66

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ФЕДотов Владимир Алексеевич

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВИХРЕВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ

(специальность 05.13.05 - Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1982г.

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ФЕДОТОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВИХРЕВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ

(специальность 05.13.05 - Элементы и устройства
техники и систем управления)

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



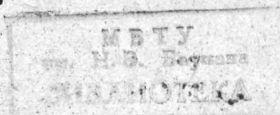
1401907

Федотов В. А. Динамические

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1982г.



Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Шульгин В.В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Некрасов Б.Б.
кандидат технических наук
Селиванов А.М.

Ведущая организация - Институт проблем управления
АН СССР

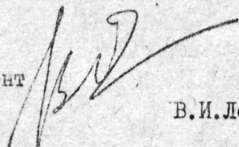
Защита состоится " _____ " 1982 г. в _____ час. _____ мин.
на заседании специализированного совета К.053.15.06 "Автоматические приводы и системы управления" в МВТУ им.Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан " _____ " 1982 г.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба
высылать по указанному адресу.

Учёный секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент



В.И.Лобачев

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Решения XXVI съезда КПСС, направленные на новый мощный подъем социалистической экономики, ставят перед современной наукой ряд новых задач. Дальнейшее развитие ряда отраслей промышленности связано с более широким внедрением струйных элементов в системы автоматического управления и регулирования.

Прежде всего это относится к энергетической, медицинской, химической и некоторым другим областям, где используются машины и агрегаты, работающие в экстремальных условиях. Вопрос создания теории и методов расчета неустановившихся течений в вихревых устройствах особенно актуален в настоящее время, когда убедительно доказана перспективность применения в ряде случаев струйных вихревых элементов (ВЭ) в гидродвигателях вместо распределителей с подвижными деталями. Работа названных вихревых устройств в установившихся режимах исследована достаточно подробно. Однако вопросы неустановившихся течений в этих устройствах практически не изучены, что в значительной степени сдерживает их применение. Таким образом исследование динамических процессов в вихревых элементах и создание новых конструкций с целью расширения области их применения и улучшения динамических параметров систем, в которых они применяются, является актуальной задачей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Создание теории и методов расчета неустановившихся течений в струйных вихревых элементах. Разработка методики проектирования ВЭ с заданными динамическими свойствами.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Создана теория развития вихревого течения в плоских цилиндрических камерах. Разработаны математические модели динамических процессов в вихревых диодах (ВД) и клапанах (ВК). Выявлено влияние конструктивных и режимных параметров на динамические свойства вихревых элементов.

Получено удовлетворительное количественное и хорошее качественное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Доказана адекватность разработанных моделей ВД и ВК действительным гидродинамическим процессам, происходящим в камерах при переходных режимах.

Впервые теоретически подтвержден колебательный характер переходного процесса в вихревом диоде. Расчетные кривые переходных процессов не только совпадают в общем с экспериментальными, но и воспроизводят наблюдавшиеся в эксперименте некоторые вторичные явления, как, например, ступенчатость переходного процесса при закрывании вихревого клапана или неодинаковое время прямого и обратного хода процесса.

Предложен алгоритм выбора рациональной геометрии ВД по заданным быстродействию и пропускной способности. Показаны новые возможности использования вихревых устройств. Разработан дефлекторный вихревой диод, отличающийся повышенной экономичностью. На основе широких экспериментальных исследований получены зависимости для оценки динамических свойств ВД и ВК.

АПРОБАЦИЯ. Основные положения и результаты работы докладывались на научно-техническом семинаре кафедр "Автоматические установки" и "Гидравлика и гидроавтоматика" МВТУ им. Н.Э. Баумана, научно-техническом семинаре Института Проблем Управления (ИПУ) АН СССР, на III и IV Всесоюзных симпозиумах по пневмоприводам (Тула, 1977 и 1981 гг.). Работа заняла 2-е место на конкурсе работ молодых ученых и специалистов МВТУ им. Н.Э. Баумана, посвященном 60-летию образования СССР (1982 г.)

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано шесть статей. Получено Авторское свидетельство и положительное решение по заявке на изобретение.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа изложена на 129 страницах машинописного текста, включая введение, 5 глав, выводы, иллюстрирована 57 рисунками на 32 страницах и тремя таблицами. Список литературы содержит 56 наименований работ.

В первой главе приведены: схемы и общий принцип работы вихревых элементов (ВД и ВК), обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию динамических характеристик вихревых диодов и клапанов, анализ общих закономерностей неустановившихся течений в струйных вихревых элементах, постановка цели и основных задач исследования.

Вихревые элементы используют свойство вихревой камеры создавать при подаче тангенциального потока повышенное давление на периферии камеры. В результате ВД препятствует протеканию жидкости через тангенциальные сопла, а ВК позволяет маломощным потоком управления регулировать мощный поток питания.

Теоретическому и экспериментальному исследованию динамических свойств вихревых диодов и клапанов посвящены работы Джэкобса и Бейкера, Харада, Ватанабе, Тэплина, Шульгина В.В. и др. Анализ работ показал, что до настоящего времени отсутствует единое представление о развитии вихревого течения в плоских цилиндрических камерах, а в некоторых случаях приводятся противоречивые данные (переходный процесс в диоде по данным Джэкобса и Харада). Это объясняется ограниченным экспериментальным материа-

лом, а также сложностью математического описания неустановившихся вихревых процессов, что заставляло исследователей либо существенно упрощать уравнения гидродинамики, представляя среду идеальной жидкостью (Шульгин В.В.), либо использовать методы электрогидродинамической аналогии для создания электрических контуров, динамически эквивалентных вихревым элементам (Теплин и Селено). Однако, как показала практика, использовать данные работы для проектирования вихревых клапанов с заданными динамическими качествами и пропускной способностью невозможно, т.к. в первом случае результаты расчетов даже качественно не соответствуют экспериментальным, а во втором случае, по признанию авторов, необходима дальнейшая проверка адекватности предложенного контура.

На основе проведенного анализа были поставлены следующие основные задачи исследования:

1. Создание теории развития вихревого течения в плоских цилиндрических камерах.
2. Разработка математических моделей ВД и ВК с учетом важнейших особенностей их функционирования в переходных режимах.
3. Проверка адекватности математических моделей на основе экспериментальных исследований динамических свойств ВД и ВК.
4. Анализ влияния геометрических параметров на динамические свойства вихревых элементов.
5. Создание методики проектирования вихревых элементов с заданными динамическими качествами.
6. Получение зависимостей для приближенной оценки динамических качеств вихревых диодов и клапанов.

Поскольку способы определения динамических параметров вихревых элементов по их переходным функциям менее трудоемки нежели частотные, и позволяют получить достаточно полный объем информации об их динамических свойствах, основное внимание в диссертации уделено исследованию переходных процессов.

Вторая глава посвящена математическому описанию переходных процессов в ВД и содержит: общий подход к описанию динамических процессов в вихревых элементах, метод расчета неустановившихся вихревых течений в плоских камерах, математические модели развития вихревого течения в ВД и ВК, анализ неустановившихся течений в этих элементах на основе математических моделей.

Так как течение в вихревых элементах систем управления, как правило, турбулентное, то для его описания целесообразно исполь-

зывать дифференциальные уравнения Рейнольдса в цилиндрических координатах, записанные для случая несжимаемой вязкой жидкости при постоянстве физических констант ρ и μ , без учета массовых сил и при условии осевой симметрии, а также равенства нулю вертикальной составляющей скорости (что справедливо в коротких цилиндрических камерах). Анализ данных уравнений, проведенный с учетом экспериментальных данных о турбулентной структуре завихренного потока в циклонных камерах позволяет значительно упростить их, приняв ряд допущений. К уже названным $\rho = \text{const}$, $\mu = \text{const}$, $\partial/\partial z = 0$, $\partial/\partial \varphi = 0$ добавим - равенство средних квадратичных пульсаций окружной и радиальной компонент вектора скорости, $\bar{u}' = \bar{v}'$; - согласно опытам окружная составляющая скорости в камере почти равна по величине модулю вектора скорости, поэтому радиальные касательные напряжения на торцовых поверхностях τ_{rz} составляют малую величину и ими можно пренебречь; - при симметричном распределении скоростей по высоте камеры при одинаковых торцовых стенках касательные напряжения на них $\tau_{\varphi z/z=0} = \tau_{\varphi z/z=H} = \tau_r$.

Таким образом в основе математической модели неустановившегося вихревого течения будем использовать следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \left[\frac{\partial v}{\partial r} + 2 \frac{v}{r} \right] &= \frac{\partial \tau_r}{\partial r} + \frac{\tau_r}{r} - \frac{\partial \tau_r}{\partial H} \\ \frac{\partial v}{\partial r} + v/r &= 0 \end{aligned} \quad \text{I.}$$

Уравнения содержат 5 неизвестных. Замыкание системы проведем, установив связь между напряжениями трения и параметрами потока. В основу решения положен численный метод расчета с разбиением объема камеры на сумму концентрических колец одинакового объема. Шаг интегрирования по времени выбирается произвольно, но не больше, чем время заполнения одного кольца начальным расходом Q_0 . С учетом полученных зависимостей $\tau = f(u)$ уравнения системы I сводятся к 2-м уравнениям, которые записываются в конечных разностях. Уравнение сохранения момента количества движения для i -го кольца в n -ый момент времени будет иметь вид

$$\begin{aligned} 2(u_{\varphi i,n} - u_{\varphi i,n-1}) \Delta r_i (r_i - \Delta r_i/2)^2 &= 2 \Delta t_n \cdot r_i^2 \text{sign}(u_{\varphi i,n} - u_{\varphi i,n-1}) + \\ &+ 2 \Delta t_n \cdot r_i^2 \text{sign}(u_{\varphi i,n} - u_{\varphi i-1,n-1}) + 2 f_{\tau n} \Delta t_n \cdot u_{\varphi i,n}^2 (r_i - \Delta r_i/2)^2 \Delta r_i / H - \\ &- u_{\varphi i,n} \Delta t_n R_k (u_{\varphi i,n} r_i - u_{\varphi i,n-1} r_{i-1}) \end{aligned} \quad \text{2.}$$

Отсюда определяется $u_{\varphi i,n}$ - средняя окружная скорость i -го кольца в n -ый момент времени. По ней находится окружная скорость кольца в конце отрезка времени Δt_n $u_{\varphi i,n} = 2u_{\varphi i,n} - u_{\varphi i,n-1}$; $\alpha = 0,014$.

Уравнение радиального количества движения записывается для всего потока в камере

$$\frac{v_{in} - v_{in-1}}{\Delta t_n} R_n \ln \bar{r}_0 + \frac{\bar{r}_0 - 1}{2} v_{in}^2 + \sum_{i=1}^n (\kappa u_{in}^2 \ln \frac{\bar{r}_i}{\bar{r}_{i+1}}) = \frac{P_n - P_0}{\rho} \quad 3.$$

Здесь P_n - давление на наружном радиусе вихревой камеры R_n , а P_0 - давление на радиусе $R_{0,ix}$ в момент времени $t_n = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n$. $\bar{r}_0 = R_n / R_{0,ix}$ - относительный радиус камеры. v_{in} - радиальная скорость на радиусе R_n в n -ый момент времени.

На первом шаге интегрирования с учетом начальных условий решаются уравнения 2, в результате чего находится поле распределения окружных скоростей по радиусу камеры. Затем из уравнения 3 для диода определяется повышение давления на периферии вихревой камеры, вызванное вращением поступившей и находившейся в камере жидкости. Для вихревого клапана из уравнения 3 определяет новое значение расхода через камеру. Найденные на первом шаге скорости и давления будут являться начальными условиями для 2-го шага.

Для установления связей между касательными напряжениями и параметрами потока рассмотрены процессы, происходящие в камере при вихревом течении.

Поток попадает в камеру из узких тангенциальных сопел с равномерным по высоте профилем скорости. Затем, при взаимодействии с торцовыми поверхностями, профиль скорости изменяется до усеченного по краям. Однако при переходе с большего радиуса на меньший вследствие конвективного ускорения профиль как бы восстанавливается, компенсируя тормозящее влияние торцовых стенок. Таким образом можно принять, что коэффициент трения о торцовые поверхности f_{rp} не зависит от радиуса и определяется только числом Re_t , подсчитанным по окружной скорости на наружном радиусе камеры, причем, по аналогии с задачей о начальном участке движения вязкой среды в плоской щели, величина f_{rp} превышает величину коэффициента трения для турбулентного гладкостенного режима течения примерно на 80%, т.е. $f_{rp} = 0,135 / Re_t^{0,25}$. Такая зависимость наилучшим образом соответствует сходимости расчетных и экспериментальных данных.

При установлении связи турбулентных касательных напряжений с параметрами потока использовано решение Гертлера для свободной границы струи, образованной двумя потоками, движущимися в одном направлении, но с разными скоростями. Приняв, что ширина зоны перемешивания не должна превышать ширины вошедшей в камеру струи, получено выражение для C_{pr} в виде $C_{pr} = 0,014 \rho \Delta U^2$

Данная методика была использована при создании математиче-

ских моделей динамических процессов в ВД и ВК.

О характере переходного процесса в вихревом диоде при подаче и снятии давления в тангенциальных соплах можно судить по изменению во времени давления P_K на периферии вихревой камеры. Давление P_K определяет расход через тангенциальные сопла, а значит и через диод, в каждый момент времени. На рис. 1 показаны кривые изменения давления на периферии камеры, полученные путем расчета по приведенной методике и экспериментально. Особо следует отметить колебательный характер полученных кривых, который отражает особенности переноса момента количества движения через вихревую камеру. Постепенно течение устанавливается вследствие трения о торцовые поверхности. Некоторое рассогласование кривых в ходе процесса может быть объяснено более сложной зависимостью коэффициентов трения от параметров течения в камере, определение вида которой является самостоятельной задачей.

Результаты расчета позволяют также проследить изменение во времени поля скоростей в камере (рис. 2), что представляет собой значительный интерес в связи с трудностями экспериментального исследования этого явления в плоских цилиндрических камерах.

Для ВК связь расходов управления и питания выражается формулой, полученной из закона сохранения момента количества движения. $U_1 = Q_2^2 / (k_2 Q_0)$. Поэтому по мере уменьшения расхода через клапан окружная скорость потока на периферии камеры возрастает. Физическая картина переходного процесса в ВК может быть представлена следующим образом: При подаче давления в тангенциальные сопла струи из них врываются в камеру. Образовавшийся на периферии закрученный поток переносится к центру камеры. Однако, пока он не достиг зоны выходного отверстия, его влияние на входящий в камеру радиальный поток не велико, т.к. центробежные силы вращающейся жидкости наиболее интенсивно нарастают там, где окружные скорости максимальны, а радиус - минимален, т.е. около выходного отверстия. Именно этим объясняется наличие площадки запаздывания, наблюдаемой у всех исследованных конструкций ВК. Достижение вращающимся потоком выходного отверстия приводит к существенному снижению расхода через камеру, т.к. значительная часть давления питания уравнивается теперь центробежными силами вращающейся жидкости. Снижение расхода приводит к увеличению окружной скорости потока на периферии камеры согласно закону сохранения момента количества движения. Однако это увеличение окружной скорости почти не сказывается на вновь уста-

новившемся расходе через камеру до тех пор, пока оно не распространится на всю камеру, т.е. не достигнет зоны выходного отверстия. Это приводит к новому уменьшению расхода через клапан и увеличению окружной скорости потока на периферии камеры. Постепенно течение устанавливается.

При снятии сигнала управления давление на периферии камеры P_k теряет часть своей составляющей, обусловленной радиальным расходом через камеру. Таким образом немедленно возникает компенсирующий расход Q_n , который начинает вытеснять вращающийся поток через центральное выходное отверстие. Однако увеличение расхода через клапан сначала не наблюдается, т.к. вращающийся поток перемещается к центру с сохранением момента количества движения и попрежнему оказывает значительное центробежное противодавление втекающему радиальному потоку. И только почти полное вытеснение вращающегося потока из камеры приводит к резкому увеличению расхода. Клапан открыт.

Таким образом, характер кривой $Q = f(t)$ определяется в основном изменением окружных скоростей около выходного отверстия. Но величина этих скоростей при одинаковой степени закрутки потока на периферии камеры определяется только усилительными функциями камеры, а именно - значением относительного радиуса $\bar{r}_0$. На рис.3 показано сравнение переходных процессов в вихревом клапане с $\bar{r}_0 = 5,2$, полученных расчетом по предлагаемой методике и экспериментально с зонда термоанемометра, установленного на оси выходного отверстия. Высокочастотные колебания отражают турбулентные пульсации в точке съема выходного сигнала. В результате сравнения теоретических и экспериментальных характеристик было установлено, что предложенная математическая модель наилучшим образом соответствует экспериментальным данным в диапазоне высот камеры $0,2 \leq H/D_k \leq 0,25$. Это объясняется пространственной картиной течения в камерах с отношением $H/D_k > 0,25$. Анализ результатов проведенных вычислений показывает, что расчетные кривые переходных процессов, полученные на основе разработанной математической модели совпадают с экспериментальными не только в общих чертах, но и воспроизводят вторичные явления, наблюдавшиеся в экспериментах, как, например, "ступенчатость" переходного процесса. Расчеты подтвердили и тот факт, что время прямого и обратного срабатывания для вихревых клапанов не одинаково и существенно зависит от геометрических параметров и величины сигнала управления.

Следует отметить, что приведенная методика позволяет рассчитывать динамические процессы в вихревом клапане при любом виде сигнала управления – импульсном, гармоническом, пилообразном и т.д.

Третья глава посвящена проверке адекватности математических моделей на основе экспериментального исследования динамических процессов в вихревых элементах. Были проведены испытания 25 типов ВД и ВК, в которых исследовалась реакция вихревых устройств на скачок давления в тангенциальных соплах. При исследовании ВД в качестве входного сигнала регистрировалось давление в тангенциальных соплах, в качестве выходного – давление на периферии вихревой камеры. Задатчиком импульсного сигнала на входе являлся профилированный диск, установленный на валу электродвигателя и обеспечивавший скачкообразное, не превышающее по времени 2 мс, изменение давления на входе в элемент. Входное и выходное давления измерялись датчиками ДМИ-0,1, работающими в комплекте с усилителем ИД-2И и шлейфовым осциллографом К-ИИ5. Особенностью экспериментальной установки для динамических испытаний ВК являлось параллельное включение другого ВК, работающего в противофазе с испытуемым. Это вызвано необходимостью поддержания постоянного перепада давления на элементе. Выходным сигналом являлись давление и скорость в горловине выходного отверстия. Измерение скорости проводилось зондом термоанемометра ТА-7М. Обработка экспериментальных данных проводилась в безразмерных критериях, полученных из π -теоремы. Сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследований, проведенного для различных вихревых элементов показало, что расхождение в определении временных параметров динамических процессов находится в пределах 17%, а основных внешних характеристик (давление и расход) – 6%, что подтверждает адекватность разработанных математических моделей.

В четвертой главе проведен анализ влияния основных геометрических параметров на динамические процессы в ВЭ. При этом сочетаются численные методы с экспериментальными. Получены зависимости для приближенной оценки динамических свойств ВЭ. У вихревых диодов исследовалось влияние на их динамические свойства: – количества тангенциальных сопел, высоты и радиуса вихревой камеры. Был установлен, что время переходного процесса в ВД находится в пределах (1,4+2,3) от $T_г^*$ (времени заполнения объема камеры начальным расходом и уменьшается с умень-

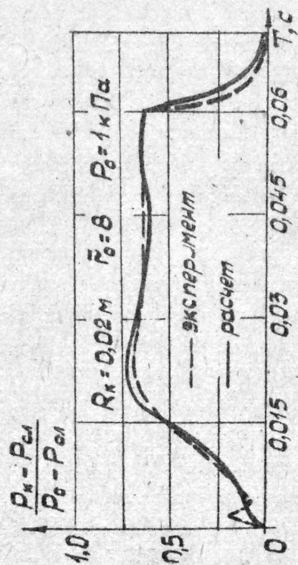


Рис.1. Переходный процесс в ВД

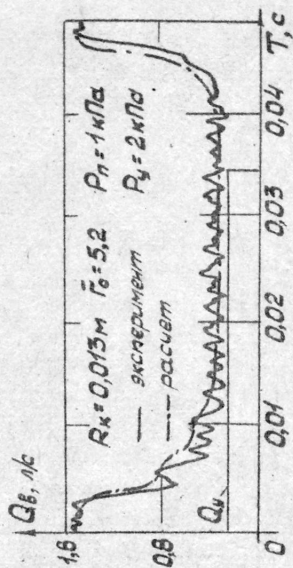


Рис.3. Переходный процесс в ВД

Таблица 1

$\bar{G}_0$	геометрия	Sh_n
8	$0.2 \leq \frac{R_k}{V} \leq 0.5$	$2.5 \div 4.5$
5	$0.13 \leq \frac{R_k}{V} \leq 0.36$	$5 \div 10$
3.5	$0.14 \leq \frac{R_k}{V} \leq 0.36$	$8 \div 15$

Таблица 2

$\bar{G}_0$	геометрия	Sh_o
8	$0.11 \leq \bar{H} \leq 0.15$	$1.4 \div 1.5$
5	$0.15 \leq \bar{H} \leq 0.23$	$1 \div 1.4$
3.5	$0.25 \leq \bar{H} \leq 0.46$	$0.6 \div 0.8$
	$0.11 \leq \bar{H} \leq 0.15$	$1.1 \div 1.5$
	$0.15 \leq \bar{H} \leq 0.23$	$1.2 \div 1.8$
	$0.23 \leq \bar{H} \leq 0.32$	$1.5 \div 1.6$

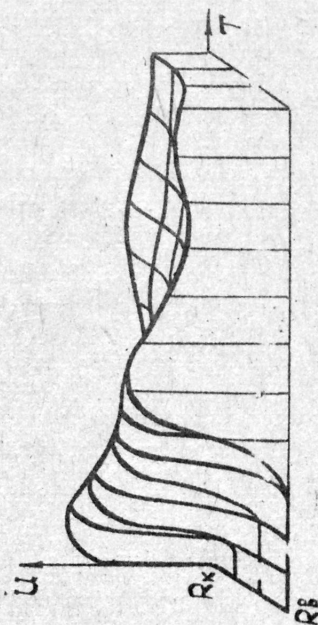


Рис.2. Картина изменения окружных скоростей в ВД

нением $\bar{t}_0$; время достижения минимального расхода через камеру $(1,4 \div 1,75) T_0^*$. С увеличением высоты камеры увеличивается как время прямого и обратного процессов, так и разность между ними. Уменьшение количества тангенциальных сопел до одного при неизменной площади сечения несколько улучшает запирающие свойства диода (до 15%). Переходный процесс при этом разделяется на две стадии и носит ступенчатый характер.

У вихревых клапанов, кроме геометрических параметров, исследовалось также влияние на динамические свойства максимального числа $Re_m = Q_{max}/2\pi r_k \nu$. Результаты проведенных исследований показывают, что для каждого ВК могут быть построены две кривые, соответствующие времени записания и отписания элемента. При этом безразмерное время переходного процесса $Sh = Q_{max} T / W_k$ остается постоянным при $Re_m \geq 1300$ для всех исследованных типов ВК. Влияние площади тангенциальных клапанов и величины сигнала управления может быть оценено по одному параметру — степени закрутки потока на периферии вихревой камеры λ , определяемой соотношением тангенциальной и радиальной составляющих скорости. При этом с увеличением степени закрутки на входе в камеру время задержки, а также время срабатывания клапана на закрытие уменьшаются. Вместе с этим время открытия клапана увеличивается. Отметим, что особо сильное влияние на время переходного процесса оказывает сигнал управления, обеспечивающий значения $10 < \lambda < 100$. Дальнейшее увеличение λ не оказывает эффективного влияния на динамику ВК. Увеличение высоты камеры увеличивает время как прямого так и обратного срабатывания. Влияние относительного радиуса $\bar{r}_0$ на динамику ВК выражается в том, что относительное время срабатывания с увеличением $\bar{r}_0$ уменьшается. При этом для клапанов с $\bar{r}_0 < 4$ время записания превышает время его открытия, а при $\bar{r}_0 > 4$ время обратного срабатывания всегда превышало время прямого (записание клапана). Динамические характеристики ВК при переходе к 2-м выходным отверстиям ухудшаются. Это относится как к прямому, так и к обратному переходным процессам. Общий анализ всей совокупности проведенных экспериментов позволил определить диапазоны изменения времени переходных процессов на предельных режимах в зависимости от геометрических параметров ВК в исследуемом диапазоне чисел $350 < Re_m < 2500$. В таблице I представлены данные, соответствующие режиму полной отсечки питающего расхода (записание клапана). В таблице II — режиму снятия сигнала управления (отписание клапана). Относи-

тельное время переходного процесса показывает соотношение времени переходного процесса и времени заполнения объема камеры расходом, протекавшим через клапан до изменения сигнала управления.

В пятой главе изложена методика проектирования ВЭ с заданными динамическими свойствами. Показаны новые возможности использования вихревых устройств в системах управления гидропневмоприводов.

Экспериментальные исследования динамики, а также математические модели ВД и ВК составляют основу для проектирования вихревых элементов, обладающих заданными динамическими свойствами. При этом математические модели используются для проведения поверочных расчетов, а диаграммы влияния геометрических параметров на динамику ВЭ — для выбора путей изменения этих параметров. Использование данной методики показано на примере проектирования вихревого элемента для системы управления пневматическим шаговым двигателем вращательного действия.

Проведенные исследования позволили установить, что при подаче в ВК сигнала управления, превышающего необходимый для записи уровень, часть расхода управления устремляется вверх по каналам питания. Этот эффект положен в основу работы дефлекторного диода. Преимуществом его перед известными является более экономное расходование рабочей среды при работе на глухой приемный канал. Применение такого диода в системе управления шаговым пневмодвигателем (А.с. 913583.СССР) позволило увеличить быстродействие двигателя более чем в 2 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обзор литературных данных по результатам исследований вихревых элементов показал, что в основном исследования были направлены на изучение установившихся режимов работы. Данные по динамическим процессам носят отрывочный, а иногда и противоречивый характер, что не позволяет использовать их для расчета и проектирования вихревых элементов с требуемыми динамическими свойствами.

2. Разработан метод расчета динамических процессов в вихревых элементах, базирующийся на математическом моделировании неустановившихся течений в вихревых камерах. Созданы математические модели вихревого диода и вихревого клапана, которые отражают функциональную связь между параметрами потока и вихре-

вой камере при динамических процессах, позволяя при этом определить все необходимые параметры процесса (T, Q, P) и исследовать влияние на них управляющих воздействий и конструктивных параметров. Созданные модели реализованы в виде программы расчета на алгоритмическом языке "Фортран-4".

3. С целью получения эмпирических зависимостей, необходимых для моделирования динамических процессов, и для проверки адекватности математических моделей физическим процессам созданы экспериментальные установки, позволяющие задавать импульсные воздействия на входе в элемент и регистрировать мгновенные значения давлений и скоростей как во входных каналах, так и в выходном отверстии или на периферии вихревой камеры. Обработка результатов эксперимента проводилась в безразмерных критериях, полученных из π -теоремы. Сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследований выявило достаточно хорошее их совпадение как с качественной, так и с количественной стороны.

4. На основании проведенных теоретических исследований динамических процессов вихревых элементов сделаны следующие выводы:

а) переходный процесс в вихревом диоде носит колебательный характер, отражающий особенности переноса момента количества движения через вихревую камеру;

б) время достижения минимального расхода через камеру у вихревого диода находится в пределах $(1,4 \div 1,75)$ от T_{δ}^* — времени заполнения объема камеры начальным расходом. Длительность всего переходного процесса не превышает $2,3 T_{\delta}^*$ и уменьшается с уменьшением $\bar{G}_0$;

в) переходный процесс в вихревом клапане при $P_v < P_{y,z}$ характеризуется "ступенчатым" изменением выходного расхода, а при $P_v > P_{y,z}$ — носит колебательный характер;

г) для предельных режимов увеличение $\bar{G}_0$ приводит к снижению времени переходного процесса при подаче сигнала управления и увеличению времени переходного процесса при снятии сигнала управления. Примерное равенство времени прямого и обратного срабатывания вихревого клапана наблюдается при $\bar{G}_0 \approx 4$;

д) влияние масштабного фактора зависит от режима работы ВК. При $\Delta P = \text{const}$ время переходного процесса $T \sim \varepsilon$; при $Re_m = \text{const}$ $T \sim \varepsilon^2$; при $Q_{\text{max}} = \text{const}$ $T \sim \varepsilon^3$;

е) превышение сигналом управления уровня, необходимого

для отсечки потока питания, приводит к возникновению обратного течения из вихревой камеры по каналам питания.

5. На основании экспериментального исследования влияния геометрических параметров на динамические свойства вихревых элементов сделаны следующие выводы:

а) основными параметрами, определяющими динамику вихревых элементов являются $\bar{F}_0$, $\bar{H}$ и λ ;

б) с увеличением числа Re_m время срабатывания ВК уменьшается;

в) наличие 2-х выходных отверстий ухудшает динамические свойства ВК, однако в статике улучшает предельные отношения для ВК с $\bar{F}_0 \gg 4$. При этом абсолютные значения расхода Q_v , увеличиваются;

г) время запаздывания τ при подаче сигнала управления $P_v \leq P_{v,у}$ ВК с $\bar{H} \leq 0,35$ определяется как $(0,5 + 0,8) T_d^*$. Причем большие значения τ относятся к ВК с меньшим значением $\bar{F}_0$ (T_d^* - время заполнения объема камеры расходом Q_{max}).

6. Общий анализ всей совокупности проведенных экспериментов позволил определить диапазоны изменения времени переходных процессов на предельных режимах в зависимости от геометрических параметров вихревой камеры и получить, таким образом, таблицы оценки динамических свойств вихревых клапанов.

7. Создан новый тип вихревого устройства - дефлекторный вихревой диод, обладающий повышенной экономичностью по сравнению с известными дефлекторными диодами. На это устройство получено положительное решение Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий от 1 апреля 1982 г. по заявке № 3339281.

8. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проектирования вихревых элементов с заданными динамическими свойствами. Достоверность такой методики была подтверждена при создании вихревого диода для системы управления пневматическим шаговым двигателем вращательного действия.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Федотов В.А., Попов Д.Н., Шульгин В.В. Вихревой усилитель с эжектором. - Труды Моск. высш. техн. уч., 1977, вып. 244, с. 72-78.

2. Попов Д.Н., Федотов В.А., Шульгин В.В. Вихревой клапан

как элемент управления пневмоприводом. - Пневматика и гидравлика. М., 1979, вып. I, с. 83-87.

3. Аппарат дыхания на струйных вихревых элементах / В. В. Шульгин, Д. Н. Попов, В. А. Федотов и др. - ИВУЗ. Машиностроение, 1979, № 5, с. 66-69.

4. Попов Д. Н., Федотов В. А., Шульгин В. В. Вихревой клапан как элемент управления пневмоприводом. - 3 Всесоюзный симпозиум по пневматическим (газовым) приводам и системам управления: Тез. докл. Тула, 1977, с. 37.

5. Федотов В. А. Переходные процессы в вихревых клапанах. - ИВУЗ. Машиностроение, 1980, № 5, с. 55-58.

6. Попов Д. Н., Федотов В. А., Шульгин В. В. Управление пневмодвигателем вихревыми клапанами и струйными усилителями. - 4 Всесоюзный симпозиум по пневматическим (газовым) приводам и системам управления: Тез. докл. Тула, 1981, с. 42.

7. А. С. № 918583 (СССР). Шаговый пневмопривод / В. А. Федотов, Д. Н. Попов, В. В. Шульгин и др. - Заявл. 24.06.80, № 2964344; опубл. в Б. И., 1982, № 13, МКИ Г15В11/12.

8. Положительное решение Гос. Ком. СССР по делам изобретений и открытий от 1 апр. 1981 г. по заявке № 3339281 на изобретение: дефлекторный вихревой диод / В. А. Федотов, Д. Н. Попов, В. В. Шульгин - от 1 окт. 1981 г.

Федотов

Л-90610 от 24.06.82 г. 3-каз 85.3 Объем 1 п. л. Тираж 100 экз.

Типография МВТУ им. Н. Э. Баумана

