

**М.М. МОРДАСОВ, Д.М. МОРДАСОВ**

# **ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ**

**Часть 1**

**КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И  
УСТРОЙСТВА ИХ РЕАЛИЗАЦИИ**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ**

УДК 53.082.32:532.137  
ББК Ж108.7я73  
М792

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ТВАИИ,  
Заслуженный работник Высшей школы РФ  
*Д.А. Дмитриев*

Доктор технических наук, профессор ТГТУ,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ  
*Ю.Л. Муромцев*

**Мордасов, М.М.**

М792 Пневматический контроль вязкости жидких веществ. Ч. 1: Капиллярные методы измерения и устройства их реализации : учебное пособие / М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов ; под ред. М.М. Мордасова. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 120 с. – 100 экз. – ISBN 5-8265-0592-3 (978-5-826-0592-2).

Учебное пособие посвящено изучению пневматических капиллярных методов и устройств контроля вязкости жидкостей как вне, так и внутри технологических аппаратов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 220200 «Автоматика и управление» и 200500 «Метрология, стандартизация и сертификация» при выполнении ими курсовых и дипломных проектов, а также специалистов, занимающихся исследованием, разработкой и эксплуатацией средств контроля состава и свойств веществ.

УДК 53.082.32:532.137

ББК Ж108.7я73

SBN 5-8265-0592-3  
(978-5-826-0592-2)

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2007  
Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

**М.М. МОРДАСОВ, Д.М. МОРДАСОВ**

# **ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ**

Часть 1

## **КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И УСТРОЙСТВА ИХ РЕАЛИЗАЦИИ**



Учебное издание

МОРДАСОВ Михаил Михайлович,  
МОРДАСОВ Денис Михайлович

**ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ  
ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ**

Часть 1

КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И  
УСТРОЙСТВА ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Учебное пособие

Редактор В.Н. Митрофанова  
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано к печати 6.06.2007  
Формат 60 × 84 / 16. 6,97 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 333

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета,  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В Тамбовском государственном техническом университете в течение длительного времени проводились и ведутся до настоящего времени работы по созданию принципиально новых аэрогидродинамических методов контроля вязкости жидких веществ. Одной из ветвей указанного научного направления является разработка капиллярных методов измерения вязкости, при реализации которых используются аэродинамические эффекты, придающие созданным пневматическим методам и устройствам новые положительные свойства.

Вязкость является физическим свойством, которое поддается количественному определению. В различных отраслях промышленности, например, химической, нефтехимической, пищевой, стекольной, лакокрасочной и других, исходные и конечные продукты подвержены колебаниям вязкости. В связи с этим о ходе технологических процессов и качестве выпускаемой продукции удобно судить по измеренным значениям вязкости.

Проблема создания новых методов и средств для автоматического контроля физико-механических свойств веществ связана с необходимостью получения оперативной информации о ходе технологических процессов, о качестве сырья, продуктов и полупродуктов. В химической, нефтехимической, лакокрасочной и других отраслях промышленности в силу специфики производств широко распространены потенциально опасные процессы, автоматический контроль которых целесообразно осуществлять пневматическими методами и средствами. Пневмогидравлическая аппаратура пожаро- и взрывобезопасна, дешева, неприхотлива, обладает простотой обслуживания.

Цель настоящего пособия дать более полное представление об одном из классических методов измерения вязкости – капиллярном методе, при реализации которого использованы аэрогидродинамические эффекты.

Учебное пособие написано по материалам лекций, читаемых авторами в Тамбовском государственном техническом университете и практических занятий, содержит результаты выполненных исследований.

Свойство жидкости сопротивляться скольжению или сдвигу проявляется при силовом воздействии, приводящем в движение слои жидкости.

В капиллярных методах течение жидкости инициируется действием перепада давления. Операции пробоотбора, компенсации и коррекции влияния неконтролируемых величин, подготовки к очередному циклу измерения могут быть осуществлены электронными управляющими устройствами и блоками. Указанные выше операции, в устройствах рассмотренных в учебном пособии, реализуются с использованием нетрадиционного вида энергии – энергии сжатого воздуха. Сжатый воздух используется как для преобразования величин однозначно определяющих контролируемый параметр, так и для реализации совокупности активных действий необходимых для осуществления процесса измерения.

Эволюция капиллярных методов и реализующих их устройств происходит по пути улучшения метрологических характеристик, упрощения конструкции, повышения надежности измерений в условиях потенциально опасных производств.

Во введении изложены основные сведения о вязкости жидкости, ее зависимости от температуры и давления. Приведены сведения о роли измерения вязкости для контроля веществ и ведения технологических процессов. Рассмотрены существующие пневматические методы измерения вязкости, приведена их классификация.

Первая глава посвящена математическому описанию течения вязкой жидкости и процессов, происходящих в обобщенном пневмогидравлическом измерительном преобразователе.

Во второй главе приведено описание пневматических методов и устройств для контроля вязкости при подаче постоянного давления в измерительный преобразователь. Рассмотрены пневматические методы измерения времени истечения применительно к вискозиметрии. Предложена классификация пневматических капиллярных вискозиметров. Рассмотрены конструкции и принцип действия различных пневматических устройств для автоматического контроля вязкости жидкостей. Приведены методы и средства компенсации и коррекции влияния неконтролируемых величин на процесс измерения.

Третья глава посвящена описанию методов и устройств для контроля вязкости при изменении количества газа в емкости измерительного преобразователя.

Авторы выражают благодарность рецензентам доктору технических наук, профессору Д.А. Дмитриеву и доктору технических наук, профессору Ю.Л. Муромцеву, взявших на себя труд рецензирования рукописи, а также кандидату технических наук, доценту Панорядову В.М. за ценные замечания, направленные на улучшение материалов учебного пособия.

1. Общие сведения о вязкости жидкости

Жидкости рассматривают как сплошные материальные системы, т.е. считают, что их вещество, а также физические характеристики, определяющие их состояние и движение, распределяются и изменяются в занятом ими пространстве непрерывно. Свойства жидкостей могут быть охарактеризованы рядом параметров, некоторые из которых незначительно, другие существенно отличаются для различных жидкостей. Вязкость – это свойство жидкостей оказывать сопротивление перемещению или сдвигу одной их части относительно другой. Вязкость дает наилучшее представление о жидкости, об изменении ее состояния и может считаться одной из основных характеристик. Так, например, плотность жидкостей от наиболее легкой – жидкого водорода – до наиболее тяжелой – расплавленной платины – отличаются в 70 раз, вязкость же от наиболее подвижных до наиболее вязких отличаются в миллиарды раз [1, 2, 3]. Если рассматривать группы родственных жидкостей (нефтепродукты, водные растворы и т.д.), то картина получается еще более разительной. Так все нефтепродукты укладываются в диапазон плотностей 650 – 1000 кг/м<sup>3</sup>, т.е. превосходят друг друга по плотности не более чем в 1,6 раза, в то же время как вязкость битумов больше вязкости петролейного эфира в 10<sup>8</sup> – 10<sup>9</sup> раз [4]. Существенно влияет на вязкость жидкости ее состав. Различные смеси воды с глицерином могут отличаться по вязкости в 1500 раз, а плотности не более чем 1,25 раза [2]. Примесь одного процента бензина в машинном масле снижает ее вязкость на 15 %, тогда как по другим параметрам это изменение состава почти неощутимо [5]. Наконец, вязкость может быть одним из самых чувствительных указателей температуры. Изменение вязкости при изменении температуры на один градус может достигать 30 % и более, что примерно в 150 раз больше температурного коэффициента расширения ртути [6]. Однако, создать термометры на таком эффекте в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия жидкости с устойчивой во времени вязкостью и удобного для этой цели метода измерения.

Большая зависимость вязкости жидкостей от их состава, структуры, строения молекул позволяет контролировать технологические процессы многих производств. Контроль вязкости жидких веществ наиболее распространен в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, по той причине, что вязкость является основным показателем, определяющим качество производимой продукции. Важное место занимает вязкость в системе показателей качества жидких углеводородных топлив [7, 8]. Важно и то, что измерение вязкости является одним из наиболее массовых анализов. Значительный удельный вес измерений состава и свойств жидкостей в производственных условиях приходится на механические методы. При определении состава и свойств пневмогидравлическими методами измеряют физико-механические характеристики жидких веществ (динамическая вязкость  $\eta_{ж}$ , плотность  $\rho_{ж}$ , поверхностное натяжение  $\sigma$ ).

Впервые наличие внутреннего трения между слоями частиц жидкости было отмечено И. Ньютоном, высказавшим в 1687 г. гипотезу о том, что величина сил внутреннего трения между слоями частиц жидкости зависит от ее свойств и пропорциональна площади поверхности соприкосновения слоев частиц (площадь трения) и их относительной скорости перемещения.

При сдвиге двух слоев жидкости при установившемся течении возникает тангенциальная сила, которая согласно закону Ньютона определяется соотношением

$$F_{\eta} = \eta_{ж} S \frac{dW}{dn},$$

где  $F_{\eta}$  – сила сдвига;  $\eta_{ж}$  – динамическая вязкость;  $S$  – площадь внутреннего трения (площадь сдвига);  $dW/dn$  – градиент скорости движения по толщине движущегося слоя (скорость сдвига);  $W$  – скорость движущегося слоя;  $n$  – толщина движущегося слоя.

За единицу динамической вязкости в Международной системе единиц принимается вязкость потока жидкости, в которой линейная скорость под воздействием давления сдвига 1 Н/м<sup>2</sup> имеет градиент 1 м/с на 1 м расстояния, перпендикулярного к плоскости сдвига. Эта единица динамической вязкости  $\eta$  имеет размерность Н·с/м<sup>2</sup> = Па·с.

Введем понятие о потоке импульса: это есть полный импульс, переносимый в одну секунду в положительном направлении оси X через единичную площадку, перпендикулярную оси X. Обозначим буквой  $\Pi$  поток импульса, который пропорционален градиенту скорости течения  $W$

$$\Pi = -\eta_{ж} \frac{dW}{dX}.$$

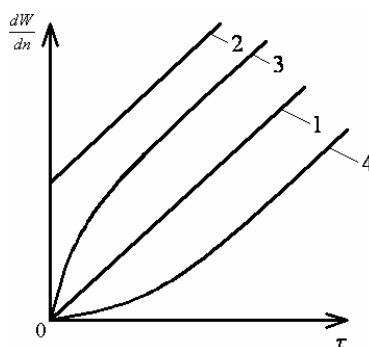
Коэффициент вязкости определяет скорость передачи импульса из одного места потока в другое. Скорость равна импульсу, деленному на массу. Поэтому быстрота выравнивания скорости потока будет определяться величиной  $\eta_{ж}/\rho_{ж}$ . Величину  $\eta_{ж}/\rho_{ж} = \nu_{ж}$  называют кинематической вязкостью, в отличие от коэффициента  $\eta_{ж}$ , называемого динамической вязкостью. Размерность  $\nu_{ж}$  совпадает с размерностью коэффициентов диффузии и температуропроводности. Кинематическая вязкость представляет собой как бы коэффициент диффузии для скорости  $W_0$ .

Если  $\eta_{ж}$  не зависит от  $dW/dn$ , то жидкости называются ньютоновскими. Все остальные жидкости называются «неньютоновскими».

Для неньютоновских жидкостей зависимость напряжения сдвига  $\tau$  и градиента скорости  $\frac{dW}{dn}$  выражается прямой, проходящей через начало координат с углом наклона определяемым вязкостью (рис. 1).

Вязкость неньютоновских жидкостей не остается постоянной, а изменяется в зависимости от скорости сдвига, его продолжительности. Поэтому зависимость напряжения сдвига  $\tau$  от  $\frac{dW}{dn}$  нелинейная. Эти зависимости называются кривыми течения.

Неньютоновские жидкости разделяются на три группы. К первой группе относятся так называемые вязкие или стационарные неньютоновские жидкости. Для этих жидкостей функция  $\frac{dW}{dn} = f(\tau)$  не зависит от времени.



**Рис. 1. Кривые течения для различных жидкостей:**

1 – ньютоновские; 2 – бингамовские пластичные;  
3 – псевдопластичные; 4 – дилатантные

По виду кривых течения различают следующие разновидности жидкостей этой группы:

– бингамовские пластичные жидкости, которые при малых напряжениях лишь несколько деформируются и начинают течь только при увеличении  $\tau$  до некоторого значения  $\tau_0$ , называемого пределом текучести. При  $\tau > \tau_0$  они ведут себя как ньютоновские. Для бингамовских жидкостей, к которым относятся очень густые суспензии, уравнение кривой течения имеет вид

$$\tau - \tau_0 = \eta_{\text{п}} \frac{dW}{dn},$$

где  $\eta_{\text{п}}$  – коэффициент пропорциональности, называемый пластической вязкостью;

– псевдопластичные жидкости, которые начинают течь, как и ньютоновские при очень малых значениях  $\tau$ . Однако  $\eta_{\text{к}}$  (кажущаяся вязкость) зависит от величины  $\tau$ . Значение  $\eta_{\text{к}}$  снижается с увеличением  $\frac{dW}{dn}$  и кривая течения переходит в прямую при большом сдвиге. Кривая течения имеет вид

$$\tau = \eta_{\text{к}} \left( \frac{dW}{dn} \right)^m, \quad (1)$$

где  $m < 1$  коэффициент, чем меньше его величина, тем больше жидкость отличается от ньютоновской;

– дилатантные жидкости характеризуются возрастанием  $\eta_{\text{к}}$  с увеличением  $\frac{dW}{dn}$ , представляют собой суспензии с большим количеством твердой фазы. Кривая течения аналогична кривой (1) для псевдопластичных жидкостей. Отличие состоит в том, что коэффициент  $m > 1$ .

Ко второй подгруппе относятся неньютоновские жидкости, у которых зависимость  $\frac{dW}{dn}$  и  $\tau$  изменяется во времени.

Кажущаяся вязкость  $\eta_{\text{к}}$  определяется не только градиентом скорости, но и продолжительностью сдвига  $\tau$ , т.е. предысторией жидкости:

- тиксотропные жидкости, у которых с увеличением продолжительности воздействия напряжения сдвига определенной величины, структура разрушается и текучесть растет. Например, в красках облегчается нанесение и задерживается стекание. Легко наблюдать явление тиксотропии на кефире или простокваше, вязкость таких жидкостей уменьшается при взбалтывании;

- реопектантные жидкости – текучесть снижается с увеличением продолжительности сдвига.

К третьей подгруппе относятся вязкоупругие или максвелловские жидкости, которые текут под воздействием напряжения  $\tau$ , но после снятия напряжения  $\tau$  частично восстанавливают свою форму, подобно упругим твердым телам.

Кажущаяся вязкость всех неньютоновских жидкостей значительно превышает вязкость воды.

## 2. Зависимость вязкости жидкостей от температуры и давления

Вязкость жидкостей обычно убывает с повышением температуры. Это естественно, так как при этом облегчается взаимное перемещение молекул. У маловязких жидкостей, например у воды, это падение, хотя и заметно, но не очень значительно.

В жидкости каждая молекула совершает колебания около незакрепленного (в кристаллическом теле около закрепленного) положения равновесия. При перемещении одних слоев жидкости относительно других ориентировка молекул

нарушается, что повышает сопротивляемость движению и тем больше, чем ниже температура. С повышением температуры сопротивляемость изменению ориентировки молекул в капельной жидкости и сопротивление ее молекул перемещению уменьшается, т.е. уменьшается сила трения.

Существует большое количество зависимостей вязкости от температуры, что говорит о неблагополучии в этой области. Ни одна из предложенных существующих зависимостей не может быть использована для выработки корректирующих или компенсирующих воздействий на получаемый в процессе измерения результат. При изменении температуры воды Пуазейль предложил определять коэффициент динамической вязкости по эмпирической формуле

$$\eta_{ж} = \eta_{0,ж} (1 + 0,0337t + 0,000221t^2),$$

где  $\eta_0$  – динамическая вязкость воды при заданной температуре  $t_0 = 0$  °С.

Торп и Роджер рекомендовали использовать полученную Пузейлем формулу и для других жидкостей, придав ей следующий вид

$$\eta_{ж} = \frac{\eta_0}{1 + \alpha t + \beta t^2},$$

где  $\alpha, \beta$  – экспериментально определяемые коэффициенты;  $\eta_0$  – вязкость при заданной температуре  $t_0$ .

Кроме того, различными авторами (Кох, Гретц, Гааз, Слот, Дефф и др.) были предложены свои формулы.

В настоящее время большинство авторов приходят либо к экспоненциальной зависимости вязкости от температуры

$$\eta_{ж} = Ae^{\frac{B}{T}},$$

либо к формуле Бачинского

$$\eta_{ж} = \frac{C}{V - b},$$

где  $A, B, C, b$  – постоянные;  $b$  – удельный объем вещества, при котором вязкость становится бесконечно большой, т.е. «предельный объем»;  $(V - b)$  – «свободный объем».

Зависимость вязкости от давления изучена недостаточно полно. Первые работы были сделаны Рентгеном и Варбургом, затем ряд ученых занимались этой проблемой (Гаузен, Фауст, Амага).

Вязкость жидкости ощутимо зависит от давления, если оно превышает 4 МПа [9]. В области высоких давлений от 100 до 400 МПа вязкость жидкости увеличивается линейно с возрастанием давления [10]. При более высоких значениях давлений эта зависимость становится логарифмической. Установлено [9], что повышение давления на 32 МПа увеличивает вязкость жидкости на величину, которая ориентировочно отвечает понижению температуры жидкости примерно на один градус.

Для давлений до 200 МПа вязкость жидкости закономерно вычисляется по формуле Андраде [9, 11].

Экспериментальные исследования зависимости вязкости некоторых жидкостей от давления по Бринджмену можно найти в [9]. Часто используют эмпирическую формулу Бринджмена [13]

$$\eta_{ж}^P = \eta_{ж}^0 e^{\alpha P},$$

где  $\eta_{ж}^P, \eta_{ж}^0$  – вязкость при атмосферном давлении и при давлении  $P$ ;  $\alpha$  – постоянный пьезокоэффициент вязкости. Эта зависимость для большинства жидкостей выполняется плохо в широком диапазоне давлений.

Влияние давления на вязкость жидкости тем больше, чем сложнее ее молекула. Например, при давлении 1148 МПа отношение вязкостей  $\eta_{ж}^P / \eta_{ж}^0$  по [9] равно для ртути – 1,32, для метанола – 10.

В 1958 году Уэббом и Шислером была предложена эмпирическая формула

$$\lg \frac{\eta_{ж}^P}{\eta_{ж}^0} = \left( \frac{B}{T} \right) \left[ \left( \frac{V_0}{V_P} \right)^4 - \left( \frac{V_0}{V_P} \right)^2 \right],$$

где  $V_0$  – удельный объем при давлении  $P_0$ ;  $V_P$  – удельный объем при давлении  $P$ ;  $B$  – эмпирическая константа;  $T$  – абсолютная температура. Эта формула лучше, чем формула Бринджмена описывает зависимость вязкости от давления.

Расчет вязкости жидких нефтепродуктов при давлениях до 25 МПа рекомендуется вычислять по формуле [12, 13]

$$\eta_{ж}^P \approx \eta_{ж}^0 (1 + 0,01P).$$

В технологических процессах преобразование веществ сопровождаемых изменением вязкости, происходит при небольших значениях давлений, поэтому можно не учитывать его влияния на вязкость при ее измерении.

### 3. Значимость вязкости для контроля жидких веществ и проведения технологических процессов

Вязкость является одним из основных реологических свойств веществ. Являясь физической величиной, которая поддается количественному определению, вязкость представляет собой свойство жидкостей оказывать сопротивление действию внешней силы, вызывающей ее течение.

Вопросы контроля вязкости имеют большое значение для современных технологических производств. В химической, нефтехимической, пищевой, стекольной, лакокрасочной и других отраслях промышленности качество технологического процесса и выпускаемой продукции, во многих случаях определяется вязкостью используемых и производимых веществ. По вязкости судят о качестве полуфабриката и готового продукта, о тех физико-химических изменениях в материале, которые происходят во время технологического процесса.

Целесообразность измерения вязкости выходит далеко за пределы сферы технических производств. Известно, что существенное влияние на работу системы кровообращения оказывает вязкость крови. С целью предотвращения инсультов рекомендуется регулярно проводить исследования крови с целью определения вязкости.

Можно выделить три группы процессов, в которых целесообразно применять технологический контроль вязкости:

- в технологическом процессе имеют место реакции, приводящие к изменению вязкости;
- качество продукции определяется вязкостью;
- качество ведения технологического процесса зависит от вязкости.

К технологическим процессам первой группы можно отнести многие процессы химических и пищевых производств. Знание закономерностей изменения реологических свойств реакционной смеси в ходе технологического процесса позволяет влиять на структуру и качество продукта путем внесения различных добавок, регулирования режима и способа механической, термической, электрической и химико-технологической обработки.

Примерами готового продукта, основным показателем качества которого является вязкость, могут служить масла. От вязкости масла в автомобильной промышленности зависят легкость пуска двигателя в холодную погоду, мощность двигателя и расход топлива. Вязкость определяет скорость поступления масла к трущимся деталям. Для каждой машины, агрегата или узла трения необходимо подбирать смазочное масло определенной вязкости. Использование масла низкой вязкости приводит к выдавливанию масляной пленки из зоны трения, повышению трения, нагреву и усиленному износу деталей. С уменьшением вязкости масла облегчается пуск двигателя, ускоряется подача масла в зазоры. Использование масел чрезмерно высокой вязкости ведет к потере мощности и, в конечном итоге, к снижению КПД машины.

В процессах производства латексных смесей для достижения необходимого качества часто бывает необходимо поддерживать вязкость в очень узких пределах. Например, для получения некоторых резиновых изделий, в которых требуется очень тонкая пленка, желательно иметь смесь с низкой вязкостью. Для изготовления большей части мажущих изделий нужна легкотекучая смесь. В некоторых случаях, например при промазке, желательно пользоваться латексной смесью с очень высокой вязкостью [81].

Подавляющее большинство процессов, качество протекания которых определяется вязкостью, связано с нанесением защитных покрытий на твердые поверхности. В этих процессах вязкость материала покрытия не должна препятствовать растеканию его по поверхности, и в то же время она должна быть достаточной для сохранения слоя требуемой толщины.

При нанесении на поверхность лакокрасочных материалов их вязкость не должна быть высокой для облегчения переноса с помощью (или через) приспособления для нанесения. Вязкость понижается при разрушении структуры краски. Из-за высоких скоростей сдвига и коротких промежутков времени, характерных для процессов переноса краски на поверхность, как эластичность, так и вязкое течение, могут изменить характер поверхностных дефектов пленки. Последние возрастают из-за нестабильного гидродинамического течения, что связано с когезионным разрушением потока краски на выходе сопла распылителя или на поверхности раздела между пленкой, прилегающей к субстрату, и выступающей кромкой, например валика, движущегося вдоль окрашиваемой подложки.

Краска должна оставаться низковязкой достаточное время для того, чтобы растечься по дефектам поверхности. Однако при низкой вязкости краска будет стекать с вертикальной поверхности под действием силы тяжести. Если толщина слишком велика, может стать заметным эффект стекания и на поверхности проявятся дефекты в виде «наплывов».

За исходной низкой начальной вязкостью краски должно последовать резкое ее увеличение, связанное с испарением растворителя или с быстрым восстановлением реологической структуры, разрушенной при воздействии напряжений сдвига в процессе переноса краски на поверхность.

В обоих случаях эффект одинаков; высыхающая пленка фактически неподвижна, и процесс стекания прекращается до того, как он станет заметным. На потерю растворителя могут влиять различная летучесть растворителей и растворимость компонентов в смеси растворителей, образующих жидкую фазу. Эти эффекты растворимости, в свою очередь, будут контролировать рост вязкости высыхающей пленки по мере испарения растворителя. При испарении наблюдается охлаждение поверхности пленки, особенно в случае быстроиспаряющихся растворителей, что также может повлиять на вязкость пленки.

В полиграфии технологический процесс печати разработан с учетом использования материалов, обладающих определенной заданной вязкостью. Слишком жидкий лак будет разбрызгиваться, слишком густой не будет растекаться. Многие материалы при поставке имеют вязкость выше рабочей и требуют доведения до необходимого значения специальным разбавителем, в этом случае необходим контроль вязкости перед началом работы. В процессе тиража вязкость лакокрасочных материалов может изменяться как в результате испарения растворителя, так и при поглощении воздуха. Непрерывный контроль вязкости позволяет получить более стабильное качество печати.

При глазировании конфетных корпусов в производстве шоколадных конфет расход шоколадной глазури в значительной степени зависит от ее вязкости. При повышенной вязкости шоколада его слой на корпусах конфет будет слишком толстым, а при пониженной – тонким [75, 76]. Знание зависимости реологических свойств полуфабрикатов кондитерского производства от температуры, влажности, продолжительности и интенсивности механического и теплового воздействия и других факторов позволяет оптимально регулировать и прогнозировать технологические параметры производства [78].

В сахарной промышленности вязкость является важным физико-химическим свойством, оказывающим влияние не только на механические процессы, но и на технологические, такие как сатурация, кристаллизация, центрифугирование. Вязкость значительно влияет на скорость кристаллизации сахарозы. Контроль вязкости сахарного производства весьма важен для снижения сахара в мелассе, так как именно на основе ее вязкости устанавливаются концентрации сухих веществ в нормальной мелассе [77].

Реологические характеристики молока и молочных продуктов являются существенными для оценки хода технологических процессов и их качественных показателей. Вязкость является прямым показателем качества многих молочных продуктов, например кефира [79]. Это объясняется тем, что вязкость кисломолочных продуктов зависит от концентрации микроорганизмов. Для различных образцов кисломолочных продуктов были получены зависимости, связывающие вязкость, содержание сухого вещества и pH [83]. Определение количества соматических клеток в сборном



молоке и отнесение его к соответствующей группе аномальности возможно путем измерения вязкости смеси молока со специальным поверхностно-активным препаратом [79].

Измерение вязкости материала используют для косвенного определения молекулярной массы, концентрации нерастворенных твердых веществ и других параметров.

Вязкость является важнейшим технологическим параметром качества в производстве полимеров и производимых на их основе различных продуктов [80]. Обусловлено это тем, что вязкость зависит от молекулярной массы и концентрации вещества, а также от его структуры в расплаве или растворе [80, 83].

Вязкость полимеров является одним из основных факторов, определяющих поведение полимеров в процессе переработки и качество получаемых изделий. Полимерные материалы, обладающие высокой вязкостью, неудовлетворительно заполняют полости пресс-форм и литьевых форм, в связи с чем при переработке таких полимеров требуются высокие температуры и давления формования. Повышение температуры формования приводит к существенному удлинению производственного цикла, увеличению усадки изделий и возрастанию энергозатрат. Повышение давления формования способствует росту ориентационных напряжений в изделии, в результате чего возникает анизотропия механических свойств, уменьшается стойкость к растрескиванию, понижается температура коробления. Формование покрытий из маловязких композиций также сопряжено с некоторыми трудностями. Литьевые и экструзионные изделия, полученные из материалов, обладающих пониженной вязкостью, часто имеют несколько ухудшенные прочностные свойства и менее стойки к износу. Повышенная текучесть способствует получению разнотолщинных изделий и образованию граба на изделиях [82].

При определении молекулярной массы полимера приготавливают несколько растворов полимера различной концентрации. Определяют время истечения чистого растворителя и растворов полимера из ограниченного объема измерительной емкости. Относительную вязкость растворов  $\eta_{отн}$  полимера определяют для трех растворов полимера разных концентраций, которые готовят разбавлением первоначально приготовленного раствора полимера в бензоле

$$\eta_{отн} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t}{t_0},$$

где  $\eta$  – вязкость раствора полимера;  $\eta_0$  – вязкость чистого растворителя;  $t$ ,  $t_0$  – время истечения раствора полимера и чистого растворителя, соответственно (при измерении вязкости методом истечения).

После каждого разбавления рассчитывают сначала удельную вязкость

$$\eta_{уд} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{\eta}{\eta_0} - 1,$$

а затем приведенную вязкость полученного раствора

$$\eta_{пр} = \frac{\eta_{уд}}{C_{пол}} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C_{пол}},$$

где  $C_{пол}$  – концентрация полимера, г/100 мл растворителя.

Предельное значение приведенной вязкости бензола при концентрации полимера, стремящейся к нулю, является его характеристической вязкостью (или предельным числом вязкости)

$$[\eta] = \lim_{C_{пол} \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C_{пол}}.$$

Значение  $[\eta]$  находят из графической зависимости, построенной в координатах приведенная вязкость – концентрация полимера, экстраполируя значения приведенной вязкости, полученные при разных концентрациях к нулевой его концентрации (рис. 2).

По характеристической вязкости рассчитывают молекулярную массу полимера  $M$

$$[\eta] = kM^\alpha,$$

где  $k$  и  $\alpha$  – коэффициенты, зависящие от природы и фракционного состава полимера и природы растворителя [75].

В стекольной промышленности вязкость определяет скорость процесса осветления расплавов стекла. Для уменьшения вязкости стекломассы ее температуру поднимают до 1500...1550 °С [84].

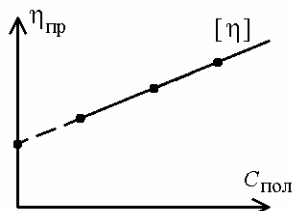


Рис. 2. График зависимости приведенной вязкости от концентрации полимера

#### 4. Пневматические методы измерения и их классификация

Вискозиметрия (лат. viscous – клейкий + гр. metre – мерю) – раздел физики, занимающийся методами измерения вязкости (внутреннего трения).

Несмотря на существование большого количества методов измерения вязкости, их развитие непрерывно продолжается, с целью увеличения точности и расширения пределов измерения, обеспечения непрерывной автоматической работы в реакционных аппаратах, повышения надежности при работе во взрыво- и пожароопасных условиях, при определении характеристик агрессивных, токсичных и коагулирующих жидкостей.

Требования, предъявляемые к современным методам измерения вязкости, сформированы в [43]:

- обоснование расчетных соотношений и указание границ применимости;
- достаточная простота конструкции, воплощающей метод, и доступность приборов, обеспечивающих реализацию метода;
- пригодность методов для измерения в широких интервалах температур и давлений;
- точность, чувствительность метода и воспроизводимость полученных результатов;
- наличие опытных данных по хорошо изученным веществам, позволяющим оценить возможности метода;
- пригодность метода для автоматизации и работы с ЭВМ.

В [14] проведен сравнительный анализ различных методов измерения вязкости с учетом условий использования соответствующих измерительных приборов в сочетании с основными устройствами пневмоавтоматики. При анализе учитывались не только метрологические показатели, но и надежность, простота элементов и устройств в изготовлении и обслуживании, возможность непосредственного включения измерительных элементов в пневматическую систему автоматического контроля, управления и др. в результате анализа авторами сделан вывод, что из известных методов измерения вязкости наиболее точным является капиллярный метод. Преимущества метода заключаются в простоте и дешевизне приборов, а также в том, что математическая теория метода точно разработана и свободна от приближений, что весьма важно для инженерной методики расчета измерительных устройств.

Научные основы вискозиметрии основаны на законах гидродинамики вязкой жидкости, а методы измерения вязкости базируются на решенных задачах гидродинамики [15].

Общая классификация методов и средств измерения реологических характеристик дана проф. М.П. Воларовичем [16, 17]. Он исходил из того, что любое устройство для измерения реологических характеристик создает и одновременно измеряет поле напряжений и деформаций внутри жидкого вещества.

По распределению полей во времени различают стационарные методы, в которых приложенные напряжения не изменяются в процессе измерения, и динамические, в которых приложенные к жидкости напряжения изменяются в процессе измерения.

По распределению полей деформаций и напряжений в объеме исследуемой среды различают методы однородной и неоднородной деформации.

В зависимости от подходов к изучению деформаций методы реометрии делят на дифференциальные, позволяющие непосредственно измерять деформацию в каждой точке исследуемого вещества, и интегральные, позволяющие наблюдать суммарный эффект действия полей деформаций. Существует большое количество интегральных методов измерения вязкости, каждый из которых соответствует определенным контролируемым веществам и условиям измерения, в основу которых положены различные физические явления и процессы. К классическим интегральным методам измерения вязкости относятся капиллярный метод (метод истечения), ротационный метод и метод Стокса.

Кроме указанных классических имеется множество других методов измерения вязкости. Поскольку вязкость вещества проявляет себя в свойстве сопротивляться силовой нагрузке, то методы измерения вязкости удобно рассматривать исходя из принципов нагружения измеряемой жидкости элементами измерительного преобразователя. Методы измерений в производственном процессе используют большей частью простые принципы нагружения, устанавливающие вид деформации исследуемого материала и измеряемые величины, при которых тензоры напряжения и скоростей деформации существенно упрощаются (табл. 1) [18].

Методы, в которых в процессе измерения на жидкость оказывается силовое воздействие (нагружение) газом и информативным параметром является один из параметров состояния газа, относятся к пневматическим. Современные пневматические методы используют все принципы нагружения, за исключением принципа, связанного с созданием течения Куэтта.

Все пневматические методы измерения вязкости по виду нагружающего элемента можно разделить на пневмометрические капиллярные, пузырьковые и деформационные (рис. 2). С учетом физических особенностей процессов, происходящих в измерительных преобразователях (ИП), пневмометрические методы можно разделить на методы истечения при постоянном давлении в емкости ИП и методы истечения при подаче газа с постоянным расходом в емкость ИП; пузырьковые – на барботажный и струйно-барботажный. Деформационные методы подразделяются на бесконтактные струйные автоколебательные, струйные с периодическим воздействием и пневмометрические.

## 1. Принципы нагружения, соответствующие им деформации и измеряемые величины

Принцип нагружения	Деформация	Измеряемая величина
Перемещение жидкости по капилляру, между параллельными плоскостями	Одномерное стационарное сдвиговое течение	Время истечения или другие величины, входящие в уравнение Пуазейля
Перемещение жидкости между вращающимися соосными цилиндрами, конусами и сферами	Одномерное стационарное сдвиговое течение (течение Куэтта)	Момент сопротивления в воспринимающей подвеске
Перемещение в жидкости тела с определенной геометрической формой и массой	Течение Стокса вокруг перемещаемых тел	Скорость равномерного движения
Колебательное взаимодействие с определенными значениями амплитудой и частотой	Одномерное осциллирующее сдвиговое течение	Ток, соответствующий амплитуде колебаний вибратора, коэффициент затухания свободных колебаний

Информативными параметрами в пневмометрическом капиллярном методе истечения с постоянным давлением в емкости ИП являются время истечения постоянного объема жидкости и объем, вытекающий из емкости ИП за постоянное время, в методе истечения с постоянным расходом газа в емкость ИП – давление в установившемся режиме истечения. В барботажных методах информативными параметрами являются скорость всплытия пузырька, время всплытия пузырька на заданное расстояние, расстояние, преодолеваемое пузырьком за постоянное время; в методах измерения по величине объема пузырька при его отрыве о вязкости судят по частоте образования пузырьков или числу образующихся пузырьков в единицу времени; в струйно-барботажных – частота автоколебательного процесса.

В бесконтактных струйных автоколебательных методах о контролируемом параметре судят по частоте автоколебаний деформированной поверхности или по изменению скоростного напора при изменении частоты автоколебаний на заданное значение. В бесконтактных струйных методах с периодическим воздействием в качестве информативных параметров используют время деформации поверхности на заданную величину, изменение амплитуды колебаний жидкости при изменении частоты на заданное значение или частоту автоколебаний в системе с обратной связью; в пневмометрических – время деформации поверхности контролируемой жидкости на заданную величину.

Приведенная классификация не является законченной и может быть расширена при разработке новых пневматических методов измерения вязкости жидкости, основанных на новых аэрогидродинамических процессах, возникающих в двухфазных системах газ–жидкость.

В табл. 2 представлены различные двухфазные системы газ–жидкость, используемые в пневматических методах.

Среди пневматических капиллярных методов измерения вязкости можно выделить 2 метода – измерение вязкости с постоянным давлением в емкости ИП (рис. 4, табл. 2), и измерение вязкости при постоянном расходе газа в емкость ИП (рис. 5, табл. 2). В первом – вязкость определяется по времени, за которое уровень жидкости в емкости ИП изменился на определенную величину, во втором – по давлению, установившемуся в емкости ИП. В этих методах жидкость закачивается в емкость ИП, после чего пропускается через измерительный капилляр. В основу положено уравнение истечения жидкости через капилляр (уравнение Пуазейля)

$$G = \frac{\pi d_k^4 \Delta P \rho_{ж}}{128 \eta_{ж} l_k},$$

где  $G$  – массовый расход жидкости через капилляр;  $\Delta P$  – перепад давления на капилляре;  $d_k$  и  $l_k$  – диаметр и длина капилляра, соответственно.

Капиллярные методы измерения вязкости имеют точное теоретическое описание и простое аппаратное исполнение. Они могут быть с успехом использованы в тех случаях, когда требуется высокая точность, но при этом допустима дискретность измерения с существенным временем запаздывания.

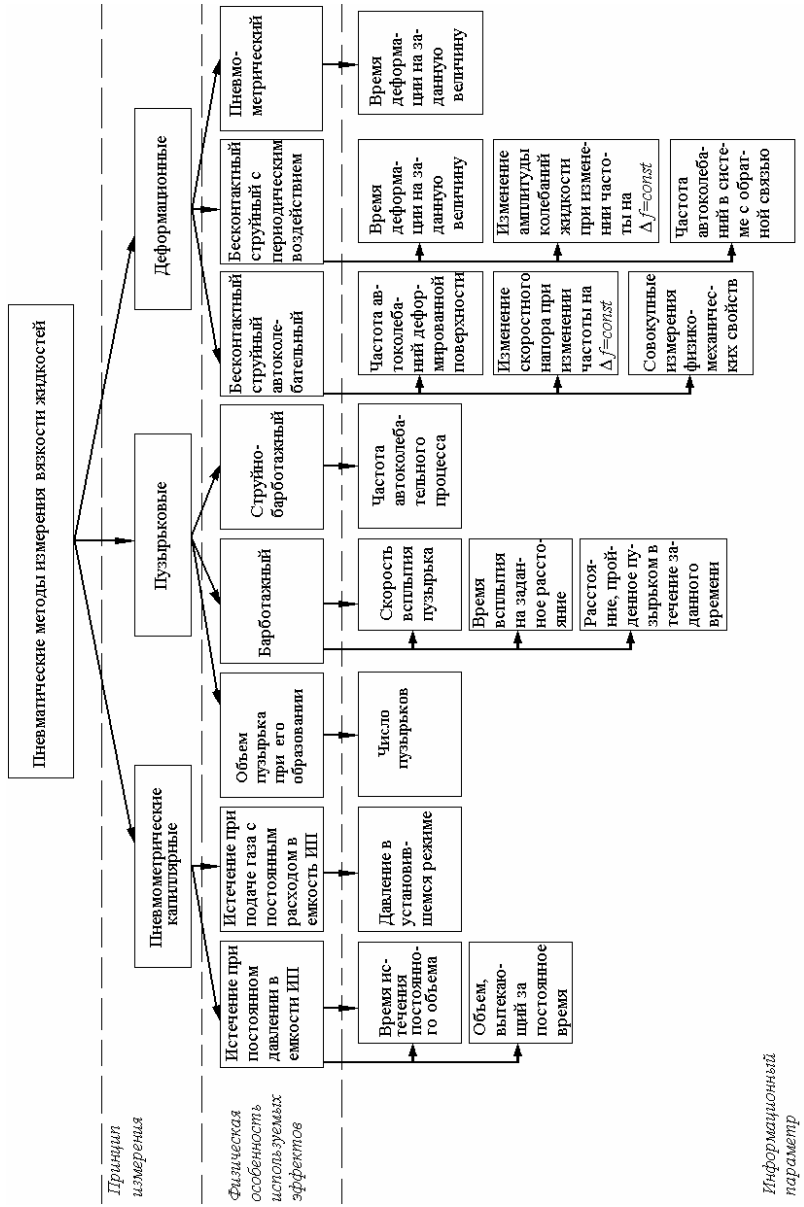
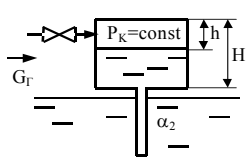
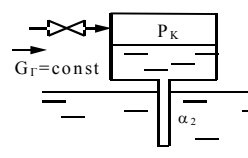
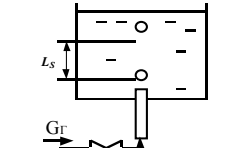
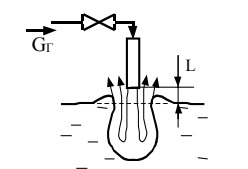
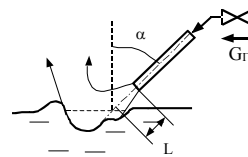
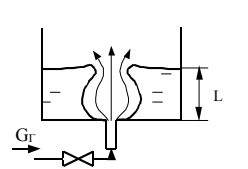


Рис. 3. Классификация пневматических методов измерения вязкости жидких веществ

## 2. Первичные измерительные преобразователи, реализующие пневматические методы контроля вязкости

№ рис.	Схема первичного измерительного преобразователя	Информативный параметр
4		Время $\tau$ , за которое уровень жидкости в емкости первичного измерительного преобразователя изменяется на величину $\Delta h$
5		Давление $P_k$ в емкости первичного измерительного преобразователя
6		Время $\tau$ прохождения пузырьком газа расстояния $L$ Объем пузырька газа при $G_g = \text{const}$
7		Частота $f$ автоколебательного процесса или скорость деформации поверхности жидкости
8		Частота колебаний отраженной газовой струи от поверхности жидкости или скорость деформации поверхности жидкости $dW/dt$
9		Частота колебаний стенки газовой камеры в жидкости

## 5. Развитие пневмогидравлических методов и средств контроля веществ

Одной из главных задач при создании систем автоматического контроля и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности является разработка первичных измерительных преобразователей состава и свойств входного и целевого продукта. По экспертным оценкам на контрольно-измерительные операции в промышленности приходится 20...25 % общественно полезного времени [19].

Качественные успехи автоматизации неразрывно связаны с достижениями в построении первичных измерительных преобразователей. В мире в настоящее время существует точка зрения: кто держит под контролем датчики, тот определяет уровень систем [20].

Несмотря на большое количество выпускаемых первичных измерительных преобразователей, требования к ним непрерывно изменяются как по точности, надежности, технологическим условиям применения, так и по числу измеряемых параметров. Поэтому следует уделять большое внимание созданию нужной номенклатуры датчиков, способной в полной мере удовлетворить потребности промышленности и науки. Для удовлетворения таких потребностей в средствах контроля и измерения необходимо, наряду с увеличением их производства, решить ряд научно-технических задач, основными из которых являются [21]:

- поиск и исследование новых физических и физико-химических методов аналитического контроля с более широкими возможностями, которые должны быть предназначены, прежде всего, для решения задачи контроля нескольких параметров одним прибором с незначительными изменениями к его конструкции и без них;
- унификация схемных и конструктивных решений приборов;
- создание измерительных систем, позволяющих просто корректировать основной процесс измерения в зависимости от изменения одной или нескольких неинформативных величин.

Выбор электрической или пневматической системы контроля зависит от местных условий эксплуатации и предъявляемых к этой системе требований. В настоящее время разрабатываются оба вида контрольно-измерительных приборов.

В таких отраслях промышленности как химическая, нефтехимическая, нефтеперерабатывающая, газовая, пищевая, лакокрасочная и ряде других пневматическая аппаратура является основным средством автоматизации. Это связано с ее надежностью, пожаро- и взрывобезопасностью, простотой обслуживания, сравнительно невысокой стоимостью.

При получении информации о протекании технологического процесса первичные измерительные преобразователи наиболее целесообразно помещать в непосредственной близости от объекта или внутри него. Таким требованиям полностью отвечают пневмогидравлические средства контроля.

Небольшое распространение анализаторов состава и свойств в качестве датчиков систем регулирования можно объяснить причинами технического характера. Отбор пробы и ее подготовка вносят нежелательное транспортное запаздывание, ненадежность в эксплуатации, сложность и громоздкость аппаратуры. Многие из этих причин устраняются при использовании пневматических методов. Эти устройства позволяют проводить аналитический контроль в технологических аппаратах без предварительного отбора пробы [22].

Уступая по точности таким методам как спектральный, электрохимический, пневмогидравлические методы превосходят их по надежности и простоте устройств, способных работать на жидкостях с различными свойствами.

При разработке новых средств аналитического контроля необходимо более полно использовать преимущества пневмогидравлических методов, так как в некоторых случаях только они позволяют осуществить простое и надежное измерение.

Разработка пневмогидравлических методов и средств аналитического контроля ускорила после того, как был предложен элементный принцип построения пневматических приборов [23 – 26]. Несколько позже предложен принципиально новый способ построения пневматических приборов на основе вновь созданных элементов струйной техники (пневмоники) [27 – 30].

В пневмогидравлических устройствах осуществляющих переработку первичной информации с выработкой управляющих воздействий, входными сигналами обычно являются давление воздуха или жидкости. Поэтому измерение пневмогидравлическим методом того или иного физического параметра сводится к получению отражающего его давления рабочей среды или в некоторых случаях параметра связанного с использованием сжатого воздуха.

В книге [31] приведены результаты исследований новых пневмогидравлических методов контроля входных параметров автоматических систем и показано, насколько широка перспектива этих методов как нового направления в измерительной технике. Для получения первичных сигналов в методах контроля используют такие процессы, как дросселирование потоков, взаимодействие струй, генерирование струйными элементами колебаний, вихреобразование, протекание газа через слой жидкости и других следует заметить, что пневмогидравлические методы контроля состава и свойств веществ разработаны недостаточно, хотя это и является одной из актуальных задач аналитического приборостроения.

В последние годы разработано большое количество пневмогидравлических средств аналитического контроля, однако делалось это в основном эвристически без учета общих принципов формирования элементов автоматики, сформулированных в работах [32 – 36]. Академик А.А. Харкевич указывал, что теория элементов позволяет избавиться от такого положения, когда каждый новый преобразователь описывается на основе частных методов анализа, подобранных специально для него, без связи с остальными. Чтобы не было такого положения, когда многие общие для всех преобразователей истины каждый раз выводятся как нечто новое [34].

Пневмогидравлический преобразователь средств аналитического контроля можно представить элементарной ячейкой, на которую действуют одно или несколько различных воздействий, в результате чего в ячейке возникает какой-то эффект или появляется какое-то физическое свойство среды, которое является выходным параметром. В связи с этим можно сказать, что для построения пневмогидравлических средств наиболее приемлем механический метод аналитического контроля. Такие методы, использующие действие сжатого воздуха, наиболее целесообразны для контроля параметров определяющих физико-химическую механику жидких веществ, таких как вязкость  $\eta_{ж}$ , плотность  $\rho_{ж}$ , поверхностное натяжение  $\sigma$ .

Механические методы контроля предполагают силовое воздействие жидкости на чувствительный элемент или силовое воздействие на жидкость газа или одного из элементов пневмогидравлического преобразователя. В качестве выходной величины при реализации пневмогидравлических методов контроля веществ могут быть использованы изменение давления газа в измерительном элементе или другие физические величины, связанные с этим изменением.

Идеальный прибор контроля вязкости жидких веществ в производственных условиях должен обладать следующими основными свойствами:

- работоспособностью в широком интервале температур и давлений;
- легкостью чистки;
- коррозионной устойчивостью;
- точностью и воспроизводимостью показаний;
- совместимостью с существующей контрольно-измерительной аппаратурой;
- высокой надежностью работы в пожаро- и взрывоопасных условиях;
- легкостью установки на существующем оборудовании;
- выходным сигналом, зависящим только от величины контролируемого параметра;
- высокой степенью унификации и стандартизации блоков, узлов и деталей, малой трудоемкостью и простотой конструкции;
- простотой изготовления, удобством в эксплуатации и ремонте.

Ни один из существующих как электрических, так и пневматических приборов не удовлетворяет всем перечисленным требованиям, однако пневматические приборы более полно соответствуют этим требованиям.

Используемые в механических методах физические процессы связаны с дросселированием потоков, протеканием газа через слой жидкости, взаимодействием струй газа друг с другом и с поверхностью жидкости, действием гидростатических сил, процессом накопления газа и др. Широко используют в приборах контроля процессы, происходящие

в первичных преобразователях, выполненных в виде пневмогидравлических камер. Они положены в основу конструкций приборов контроля различных параметров технологических процессов [31, 37 – 40].

В работе [30] профессором Л.А. Залманзоном дан теоретический анализ проточных элементов пневматических приборов. Были обобщены результаты исследований ряда авторов, рассмотрены основные характеристики процессов дросселирования, причем отмечены особенности дросселей, используемых в пневматических приборах контроля. Наряду с упрощенными методами расчета дросселей, предложены общие методы расчета, основанные на использовании выводов газодинамической теории течения в трубах. Исследованы статические характеристики пневматических камер с дросселями различных типов, а также вопросы динамики пневматических камер. Рассмотрение камер ограничивалось рассмотрением однофазных потоков.

Впервые в [48] предложен обобщенный подход к созданию и теоретическому анализу капиллярных методов и реализующих их устройств. Основным блоком таких устройств является пневмогидравлический измерительный преобразователь.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАПИЛЛЯРНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ

## 1.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

### 1.1.1. Уравнения движения вязкой жидкости Навье–Стокса

Большое распространение в технике измерения вязкости получили методы истечения, в основу которых положен закон, регулирующий поток жидкости в капилляре (трубке малого диаметра).

Движения вязкой жидкости может быть описано системой дифференциальных уравнений, решение которой представляется более точным для ламинарного течения, чем для турбулентного. Для составления системы в соответствии с предложениями Навье и Стокса выделим элементарный параллелепипед со сторонами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  (рис. 1.1) и рассмотрим условия его равновесия с учетом сил инерции, воспользовавшись принципом Даламбера.

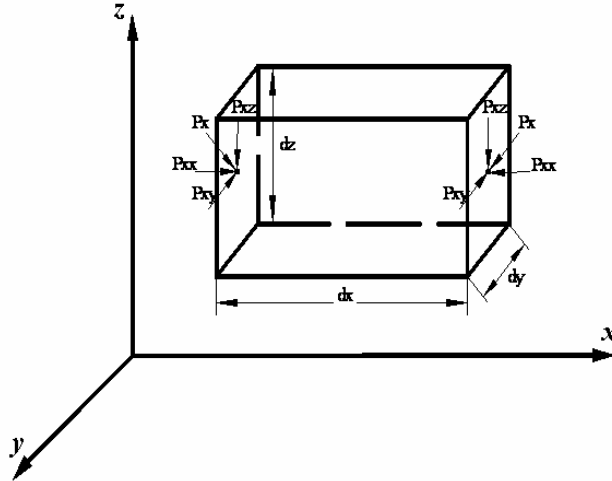


Рис. 1.1. Элементарный объем жидкости

Если обозначить отнесенные к единице массы, составляющие объемных сил через  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и аналогичные силы инерции через

$$1 \cdot \frac{dU_x}{dt}; \quad 1 \cdot \frac{dU_y}{dt}; \quad 1 \cdot \frac{dU_z}{dt},$$

то они войдут в уравнение равновесия в следующем виде:

$$X - \frac{dU_x}{dt}; \quad Y - \frac{dU_y}{dt}; \quad Z - \frac{dU_z}{dt}.$$

Поверхностные единичные силы – гидростатические давления – обозначим через  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ . И учтем, что в вязкой жидкости могут быть касательные напряжения, т.е. гидростатические давления  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  не ортогональны, к площадям на которые они действуют. В связи с этим обозначим составляющие единичных поверхностных сил следующим образом:

силы  $P_x$  .....  $P_{xx}$ ,  $P_{xy}$ ,  $P_{xz}$ ;

силы  $P_y$  .....  $P_{yx}$ ,  $P_{yy}$ ,  $P_{yz}$ ;

силы  $P_z$  .....  $P_{zx}$ ,  $P_{zy}$ ,  $P_{zz}$ .

При принятых обозначениях составляющие равнодействующих поверхностных сил параллельные координатным осям, могут быть легко представлены, например, для оси  $Ox$ :

$$\left( P_{xx} - \frac{dP_{xx}}{dx} dx - P_{xx} \right) dydz + \left( P_{yx} - \frac{dP_{yx}}{dy} dy - P_{yx} \right) dx dz + \left( P_{zx} - \frac{dP_{zx}}{dz} dz - P_{zx} \right) dy dx = \left( \frac{dP_{xx}}{dx} + \frac{dP_{yx}}{dy} + \frac{dP_{zx}}{dz} \right) dx dy dz. \quad (1.1)$$

По аналогии, составляющие по координатным осям равнодействующих поверхностных сил, отнесенные уже к единице объема, т.е. деленные на  $dx dy dz$ , могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{cases} N_x = \frac{dP_{xx}}{dx} + \frac{dP_{yx}}{dy} + \frac{dP_{zx}}{dz}; \\ N_y = \frac{dP_{xy}}{dx} + \frac{dP_{yy}}{dy} + \frac{dP_{zy}}{dz}; \\ N_z = \frac{dP_{xz}}{dx} + \frac{dP_{yz}}{dy} + \frac{dP_{zz}}{dz}. \end{cases} \quad (1.2)$$

Из условия равновесия легко установить, что

$$P_{xy} = P_{yx}, \quad P_{zy} = P_{yz} \quad \text{и} \quad P_{zx} = P_{xz}.$$



Обозначим нормальные напряжения через  $P_{ii}$ , а касательные через  $\tau$ , тогда уравнение (1.2) можно представить в виде:

$$\begin{cases} N_x = \frac{dP_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz}; \\ N_y = \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{dP_{yy}}{dy} + \frac{d\tau_{zy}}{dz}; \\ N_z = \frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \frac{dP_{zz}}{dz}. \end{cases} \quad (1.3)$$

Имея компоненты всех сил по координатным осям – объемных, сил инерции и поверхностных, можем написать систему уравнений равновесия, отнесенные к единице массы (разделим на  $dx dy dz$ ):

$$\begin{cases} \frac{dU_x}{dt} = x - \frac{1}{\rho_{ж}} \left( \frac{dP_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} \right); \\ \frac{dU_y}{dt} = y - \frac{1}{\rho_{ж}} \left( \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{dP_{yy}}{dy} + \frac{d\tau_{zy}}{dz} \right); \\ \frac{dU_z}{dt} = z - \frac{1}{\rho_{ж}} \left( \frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \frac{dP_{zz}}{dz} \right). \end{cases} \quad (1.4)$$

В гидродинамике вязкой жидкости эта система уравнений имеет много независимых переменных и поэтому для ее решения необходимо принимать ряд допущений, не противоречащих физической основе несжимаемости жидкости.

**Допущение 1.** Каждое из нормальных и главных напряжений складывается из двух величин: давления ( $-P$ ), присущего невязкой жидкости (знак минус взят потому, что давление направлено внутрь жидкости, а координатные оси – наоборот), и добавочного нормального или главного напряжения, обусловленного вязкостью, например:

$$P_1 = -P + P'_1; \quad P_2 = -P + P'_2; \quad P_3 = -P + P'_3; \quad (1.5)$$

$$P_{xx} = -P + P'_{xx}; \quad P_{yy} = -P + P'_{yy}; \quad P_{zz} = -P + P'_{zz},$$

где  $P'_1, P'_2, P'_3$  – добавочные главные напряжения от сил вязкости;  $P'_{xx}, P'_{yy}, P'_{zz}$  – добавочные нормальные напряжения от сил вязкости.

**Допущение 2.** Из анализа напряженного состояния жидкости устанавливается, что сумма трех главных напряжений  $P_i$  должна быть равна сумме трех нормальных напряжений  $P_{xx}, P_{yy}, P_{zz}$ , т.е.

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_{xx} + P_{yy} + P_{zz}. \quad (1.6)$$

Касательные напряжения являются зависимостями:

$$\begin{cases} \tau_{xy} = \tau_{yx} = \eta_{ж} \left( \frac{dU_x}{dt} + \frac{dU_y}{dt} \right); \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} = \eta_{ж} \left( \frac{dU_y}{dz} + \frac{dU_z}{dy} \right); \\ \tau_{zx} = \tau_{xz} = \eta_{ж} \left( \frac{dU_z}{dx} + \frac{dU_x}{dz} \right); \end{cases} \quad (1.7)$$

**Допущение 3.** Добавочные главные напряжения  $P'_1, P'_2, P'_3$  связаны со скоростью относительных удлинений вдоль главных осей деформаций линейно.

Это допущение практически сводится к тому, что  $P'_1, P'_2, P'_3$  являются линейными и однофазными функциями скоростей относительных удлинений  $\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2, \bar{\varepsilon}_3$  вдоль главных осей деформации. Для несжимаемой жидкости это допущение приводит к тому, что добавочные главные напряжения зависят только от скоростей относительного удлинения вдоль главной оси деформации, соответствующей данному напряжению

$$P'_1 = 2\eta_{ж} \frac{dU_x}{dx}; \quad P'_2 = 2\eta_{ж} \frac{dU_y}{dy}; \quad P'_3 = 2\eta_{ж} \frac{dU_z}{dz}. \quad (1.8)$$

Подставляя значения (1.8) в уравнения (1.5) и учитывая, что

$$\frac{dU_x}{dx} + \frac{dU_y}{dy} + \frac{dU_z}{dz} = 0,$$

получаем

$$\begin{cases} P_1 = -P + 2\eta_{\text{ж}} \frac{dU_x}{dx}; \\ P_2 = -P + 2\eta_{\text{ж}} \frac{dU_y}{dy}; \\ P_3 = -P + 2\eta_{\text{ж}} \frac{dU_z}{dz}; \\ \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} = -P = \frac{P_{xx} + P_{yy} + P_{zz}}{3}. \end{cases} \quad (1.9)$$

Подставляя в систему уравнений (1.4) значения  $P_{xx}$ ,  $P_{yy}$ ,  $P_{zz}$  по уравнениям (1.5), а значения касательных напряжений по уравнениям (1.7), получим систему дифференциальных уравнений Навье–Стокса, для несжимаемых жидкостей:

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{dP}{dx} = \frac{dU_x}{dt} + \nu_{\text{ж}} \nabla U_x, \\ Y - \frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{dP}{dy} = \frac{dU_y}{dt} + \nu_{\text{ж}} \nabla U_y, \\ Z - \frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{dP}{dz} = \frac{dU_z}{dt} + \nu_{\text{ж}} \nabla U_z, \end{cases} \quad (1.10)$$

где  $\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа. Таким образом, в уравне-

ниях (1.10) членами  $-\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{dP}{dx}$ ,  $-\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{dP}{dy}$ ,  $-\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{dP}{dz}$  учитывается действие сил давления, членами  $\nu_{\text{ж}} \nabla U_x$ ,  $\nu_{\text{ж}} \nabla U_y$ ,  $\nu_{\text{ж}} \nabla U_z$

влияние вязкости, членами  $\frac{dU_x}{dt}$ ,  $\frac{dU_y}{dt}$ ,  $\frac{dU_z}{dt}$  учитывается действие сил инерции. Можно развернуть выражения этих

последних членов, имея в виду, что

$$\begin{aligned} \frac{dU_x}{dt} &= \frac{\partial U_x}{\partial t} + \frac{\partial U_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial U_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial U_x}{\partial t} + \frac{\partial U_x}{\partial x} U_x + \\ &+ \frac{\partial U_x}{\partial y} U_y + \frac{\partial U_x}{\partial z} U_z \end{aligned}$$

и аналогичным образом можно представить  $\frac{\partial U_y}{\partial t}$  и  $\frac{\partial U_z}{\partial t}$ .

Система уравнений Навье–Стокса решается совместно с уравнением неразрывности.

По заданным компонентам массовых сил  $1x$ ,  $1y$ ,  $1z$  при постоянной плотности ( $\rho_{\text{ж}} = \text{const}$ ) компоненты скорости  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  и давления  $P$  определяется как функция времени  $t$  и координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Обычно для определения этих функций надо располагать начальными данными и принимать во внимание граничные условия. При этом важно учитывать особые условия движения у жесткой стенки – частицы вязкой жидкости прилипают к жестким стенкам ( $U = 0$ ), а не скользят по ней, как это наблюдается в идеальной жидкости.

### 1.1.2. Одномерное установившееся течение вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрическом канале и по кольцевому зазору. Формула Пуазейля

При одномерном установившемся течении вязкой жидкости на участке цилиндрического канала с диаметром  $d_k$  и длиной  $l_k$ , система уравнений (1.10) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial U_x}{\partial x} U_x = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_{\text{ж}} \nabla U_x, \\ 0 = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial P}{\partial y}, \\ 0 = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial P}{\partial z}. \end{cases} \quad (1.11)$$

Из последних двух уравнений следует независимость давления  $P$  от координат  $y$  и  $z$ .

Так как в рассматриваемом случае уравнение неразрывности

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0$$

дает

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} = 0,$$

то из первого из указанных выше уравнений (1.11) по раскрытию выражения  $\Delta U_x$  получается

$$v_{ж} \rho_{ж} \left( \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} \right) = \frac{dP}{dx}. \quad (1.12)$$

Так величины, стоящие в левой части выражения (1.12), зависят только от  $y$  и  $z$ , а в правой части только от  $x$ , данное равенство возможно только при  $\frac{dP}{dx} = \text{const}$ . Если принять, что  $\frac{dP}{dx} = -\frac{\delta P}{l_k}$ , где  $\delta P$  – разность давлений на рассматриваемом

участке канала, то получается

$$v_{ж} \rho_{ж} \left( \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} \right) = \frac{\delta P}{l_k}.$$

Решением этого уравнения при граничном условии  $U_x = 0$  для  $r = \sqrt{y^2 + z^2}$  является выражение

$$U_x = \frac{\delta P}{4\eta_{ж} l_k} \left[ \left( \frac{d_k}{2} \right)^2 - r^2 \right], \quad (1.13)$$

называемое формулой Пуазейля.

Если ввести в закон распределение скоростей  $U_{x\text{max}}$ , и использовать выражение  $Re = \frac{d_k U_{ж} \rho_{ж}}{\eta_{ж}}$ , то формула Пуазейля преобразуется к виду

$$\delta P = \frac{64 l_k \rho_{ж} U^2}{Re d_k^3}. \quad (1.14)$$

Подставляя указанное выше в (1.13) значение  $U_x$  в выражение объемного расхода

$$Q = \int_0^{-d_k/2} U_x 2\pi r dr,$$

получим

$$Q = \frac{\pi d_k^4}{128 \eta_{ж} l_k} \delta P. \quad (1.15)$$

Соответственно для массового расхода

$$G = \frac{\pi d_k^4 \rho_{ж}}{128 \eta_{ж} l_k} \delta P. \quad (1.16)$$

Для канала круглого сечения величина критерия Рейнольдса не должна превышать  $Re_{кр} = 2300$ .

Аналогичным образом проводится интегрирование системы уравнения движения и уравнения неразрывности для случая течения жидкости по узкому зазору между двумя плоскостями. Считая, что течение по кольцевому зазору между стержнем и втулкой проходит так же, как и по щели между двумя плоскостями (радиальный зазор  $\delta$  намного меньше среднего диаметра  $D$ ), получим соответственно

$$Q = \frac{\pi D \delta^3}{8 \eta_{ж} l_k} \delta P, \\ G = \frac{\pi D \delta^3 \rho_{ж}}{8 \eta_{ж} l_k} \delta P. \quad (1.17)$$

При проведении расчетов обычно, учитывая опытные данные, вводят в выражение (1.17) поправочный коэффициент 0,67 или, в знаменателе правой части этих выражений численный множитель 8 заменяют множителем 12. Для канала в виде щелевого зазора

$$Re = \frac{2U\delta\rho_{ж}}{\eta_{ж}} \quad \text{и} \quad Re_{кр} = 1100.$$

### 1.1.3. Элементарное решение Гагенбаха задачи об одномерном установившемся течении вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрическом канале

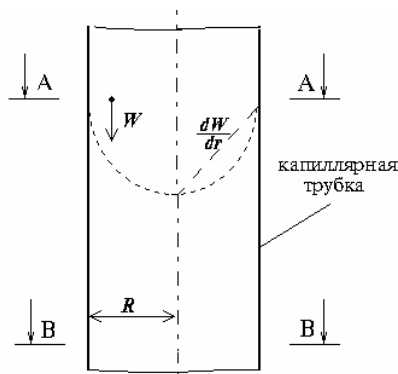
Существует элементарное решение задачи определения скорости течения вязкой жидкости по капиллярной цилиндрической трубке выполненное Гагенбахом [44].

Рассмотрим поток в капиллярной цилиндрической трубке длиной  $l_k$  и радиусом  $r_k$  (рис. 1.2). Разность давлений  $\Delta P$  заставляет жидкость течь сквозь трубку. Предположим, что поток ламинарный и каждая частица жидкости движется параллельно оси цилиндра с постоянной скоростью  $W$ . Вследствие симметрии скорость будет постоянна для всех точек, лежащих на одной окружности, так что мы можем считать, что жидкость состоит из цилиндрических слоев, скорость которых является функцией радиуса.

Сила, с которой перепад давления  $\Delta P$  действует на цилиндр радиусом  $r$ , равна

$$F_p = \pi r^2 \Delta P,$$

в то же время  $F_{\eta}$ , сила сопротивления вокруг поверхности цилиндра, обусловленная вязкостью жидкости, в соответствии с законом Ньютона, через



**РИС. 1.2. СКОРОСТЬ И ГРАДИЕНТ СКОРОСТИ В КАПИЛЛЯРНОЙ ТРУБКЕ**

произведение площади, коэффициента вязкости  $\eta_{ж}$  и градиента скорости  $dW/dr$ , выразится в виде

$$F_{\eta} = 2\pi r l_{к} \eta_{ж} \frac{dW}{dr}$$

Если предположить, что движение цилиндра не ускоряется, т.е.  $W$  остается постоянной, то силы  $F_p$  и  $F_{\eta}$  должны быть равны и противоположно направлены, т.е.:

$$F_p = -F_{\eta},$$

поэтому

$$r\Delta P = -2l_{к} \eta_{ж} \frac{dW}{dr}, \quad (1.18)$$

откуда градиент скорости будет равен

$$\frac{dW}{dr} = -\frac{r\Delta P}{2l_{к} \eta_{ж}}. \quad (1.19)$$

Интегрируя (1.19), находим, что

$$W = -\frac{r^2 \Delta P}{4l_{к} \eta_{ж}} + C. \quad (1.20)$$

Для определения константы интегрирования  $C$  необходимо найти граничное условие. Обычное предположение заключается в том, что слой, соприкасающийся со стенкой трубки, прилипает к ней, поэтому скорость течения жидкости  $W = 0$  при  $r = r_{к}$ . Константу интегрирования с учетом граничного условия определим в виде

$$C = \frac{r_{к}^2 \Delta P}{4l_{к} \eta_{ж}}.$$

После подстановки  $C$  в (1.20) получаем определенное выражение для скорости:

$$W = \frac{\Delta P}{4l_{к} \eta_{ж}} (r_{к}^2 - r^2). \quad (1.21)$$

Уравнение (1.21) представляет собой уравнение параболы (рис. 1.2), ось которой совпадает с осью  $W$ , тогда как ось  $r$  находится на расстоянии  $\frac{r_{к}^2 \Delta P}{4l_{к} \eta_{ж}}$  от вершины кривой. Частицы жидкости, находившиеся в плоскости  $AA$  в момент,

соответствующий начальному времени, окажутся через единицу времени на поверхности параболоида, профиль которого определяется уравнением (1.21), другими словами, объем этого параболоида равен объему жидкости  $V$ , протекающему по капиллярной трубке в единицу времени, т.е. объемному расходу  $Q$ . Объем этого тела вращения равен

$$Q = 2\pi \int_0^{r_{к}} W r dr.$$

Подставляя в это уравнение значение  $W$ , получаем

$$Q = \frac{\pi \Delta P}{2l_{к} \eta_{ж}} \int_0^{r_{к}} (r_{к}^2 - r^2) r dr = \frac{\pi \Delta P r_{к}^4}{8l_{к} \eta_{ж}}. \quad (1.22)$$

Это выражение идентично тому, которое было найдено Пуазейлем эмпирически. Формула (1.22) называется формулой Пуазейля. Формула Пуазейля была получена ранее в п. 1.1.2 из системы дифференциальных уравнений Навье–Стокса [45].

Формула Пуазейля справедлива для ламинарного потока жидкости. Осборн Рейнольдс доказал, чем больше вязкость жидкости, тем слабее проявляется ее способность образовывать вихри. Константой, определяющей характер потока, является кинематическая вязкость. В трубе с постоянными геометрическими размерами жидкость с меньшей кинематической вязкостью, образует вихри при меньших скоростях, чем жидкость с большей кинематической вязкостью.

Рейнольдс показал, что условия потока для каждой капиллярной трубки и жидкости характеризуются некоторым критерием, не имеющим размерности. Такой критерий называется критерием Рейнольдса [46]

$$Re = \frac{Wd_k \rho_{ж}}{\eta_{ж}} = \frac{Wd_k}{\nu_{ж}}$$

Переход ламинарного потока в турбулентный должен происходить, когда  $Re$  достигнет некоторого значения от 1400 до 2200. Это определено экспериментальным путем для капилляров.

Ограничивая скорость течения значениями, не достигающими тех, которые соответствуют  $Re = 1400$ , может быть исключена турбулизация потока контролируемой жидкости.

Пуазейль экспериментально доказал, что в его формулу необходимо вводить поправку на кинетическую энергию. Поправку на кинетическую энергию получили Гагенбах и Куэтт. При приложении продавливающего перепада давления  $\Delta P$  часть его идет на преодоление вязкого сопротивления, тогда как остальная часть идет на увеличение кинетической энергии жидкости.

Значение вязкости с поправкой на кинетическую энергию определяется уравнением [47]

$$\eta_{ж} = \frac{\pi \Delta P r_k^4}{8l_k Q} - \frac{m Q \rho_{ж}}{8\pi l_k},$$

где  $m$  – численный коэффициент.

Коэффициент  $m$  у различных авторов имеет различные значения от 0,8 до 1,12 (Гагенбах  $m = 0,793$ ; Куэтт  $m = 1,00$ ; Буссинеск  $m = 1,12$ ).

Куэтт предложил учитывать влияние турбулизации потока у концов капилляра. Эта поправка сводится к «фиктивному» удлинению капилляра. При этом формула для определения вязкости имеет вид

$$\eta_{ж} = \frac{\pi \Delta P r_k^4}{8Q(l_k + \lambda)} - \frac{m Q \rho_{ж}}{8\pi(l_k + \lambda)},$$

где  $\lambda$  – коэффициент, определяемый опытным путем.

Поскольку мы рассматриваем случай стационарного потока, объем жидкости  $V$ , протекающей по капилляру в течение времени  $t$ , равен

$$V = \frac{\pi \Delta P r_k^4}{8l_k \eta_{ж}} t. \quad (1.23)$$

Как видно из (1.22) и (1.23) о вязкости можно судить путем измерения соответствующих физических величин, входящих в уравнение Пуазейля, т.е.

$$\eta_{ж} = k_1 \Delta P, \quad \text{где } k_1 = \frac{\pi r_k^4}{8l_k Q} = \text{const},$$

$$\eta_{ж} = k_2 \frac{1}{Q}, \quad \text{где } k_2 = \frac{\pi \Delta P r_k^4}{8l_k} = \text{const},$$

$$\eta_{ж} = k_3 t, \quad \text{где } k_3 = \frac{\pi r_k^4 \Delta P}{8l_k V} = \text{const},$$

$$\eta_{ж} = k_4 \frac{1}{V}, \quad k_4 = \frac{\pi r_k^4 \Delta P t}{8l_k} = \text{const}.$$

При любом методе измерения вязкости нужно иметь в виду, что вязкость, как было указано выше, в значительной степени зависит от температуры и, как правило, с увеличением температуры падает для жидких веществ и возрастает для газов. Поэтому температуру, при которой определяется вязкость вещества, необходимо всегда точно знать и поддерживать постоянной в течение измерений. Если нет возможности поддерживать заданное значение температуры, то необходимо осуществлять коррекцию результатов измерения или компенсацию влияния величин температуры на происходящие физические процессы.

## 1.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБОБЩЕННОГО ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Реализация пневматических методов измерения вязкости жидкостей возможна устройствами, работающими в непрерывном, дискретном и непрерывно-дискретном режимах. Общность физических процессов, используемых при реализации капиллярных методов, позволила синтезировать обобщенную конструкцию пневмогидравлического измерительного элемента (ПГИЭ), способного работать как внутри (погружного типа), так и вне контролируемой жидкости (выносного типа) [48, 49]. Структурные схемы пневматических измерительных элементов представлены на рис. 1.3. Такое представление ПГИЭ позволяет решить вопрос о едином математическом описании физических процессов, происходящих при измерении, что в свою очередь дает возможность учитывать влияние конструктивных особенностей выполнения измерительного преобразователя и неконтролируемых величин на результат измерения.

Газ и жидкость, участвующие в измерительном процессе, предполагают использование некоторого емкостного элемента с дросселирующими органами  $D_1$  и  $D_3$  для газа,  $D_2$  и  $D_4$  для жидкости. Дроссели  $D_1 \dots D_4$  имеют проводимости  $\alpha_1 \dots \alpha_4$ , соответственно. Давления  $P_1 \dots P_4$  на входах соответствующих дросселей и расходы веществ  $G_1 \dots G_4$  через эти дроссели могут быть как постоянными, так и переменными

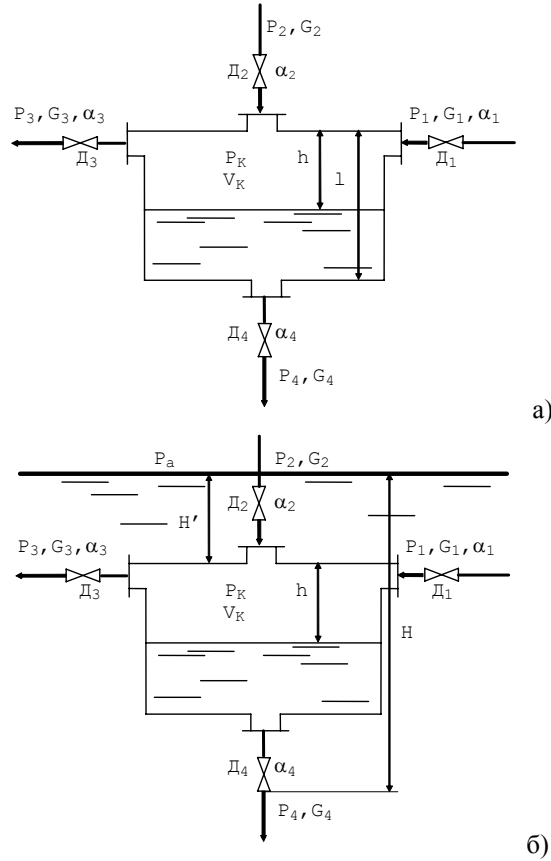
Рассмотрим процессы, происходящие в ПГИЭ, учитывая, что:

– в переходном режиме расход газа по дросселю  $D_1$  в каждый фиксированный момент времени является таким же, каким он был при данном перепаде давлений в установившемся режиме;

- течение газа через емкость изотермическое;
- влияние вязкости жидкости на перемещение ее по емкости незначительно;
- течение газа и жидкости по дросселям ламинарное.

Первое допущение основывается на том, что обычно объем пневмогидравлической камеры во много раз превосходит объем пневматических сопротивлений, а второе – на том, что разность во времени заполнения пневмогидравлической камеры в политропическом режиме, реально имеющем место в данном случае, и в принятом изотермическом процессе при малых перепадах давлений очень мала.

На основе фундаментальных законов сохранения массы, количества движения, энергии, а также уравнения газового состояния после соответствующего преобразования и упрощения математическое описание обобщенного ПГИЭ может быть получено в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений.



**Рис. 1.3. Структура пневмогидравлических измерительных элементов:**

а – выносного; б – погружного типа

Учитывая, что в ПГИЭ выносного типа (рис. 1.3, а) объем газового пространства  $V_r = Sh = var$ , где  $S$  – площадь сечения емкости;  $h$  – высота газового пространства, уравнение, описывающее динамику процессов в газовом пространстве ПГИЭ при постоянных давлениях на соответствующих входах дросселей, можно представить в виде

$$\frac{S}{RT} \left( h \frac{dP_k}{dt} + \bar{P}_k \frac{dh}{dt} \right) = \alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3 - (\alpha_1 + \alpha_3) P_k, \quad (1.24)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура газа;  $P_k, \bar{P}_k$  – избыточное и абсолютное давление в емкости  $V_k$ .

По дросселям  $D_2$  и  $D_4$ , имеющими постоянную во времени проводимость, проходит жидкость. Массовый расход жидкости на отрезке времени от  $t$  до  $(t + dt)$ , будем считать постоянным и равным массовому расходу в момент времени  $t$ . Так как массовое количество жидкости

$$\theta_{ж} = \rho_{ж} V_{ж},$$

где  $V_{ж} = S(l - h)$  – объем жидкости в емкости,  $l$  – длина емкости, то

$$d\theta_{ж} = -\rho_{ж} S dh.$$

В то же время, изменение количества жидкости  $d\theta_{ж}$  определяется как разность количества жидкости  $\theta_2$ , поступившей в емкость  $V_k$ , и вытекшей  $\theta_4$  из нее, т.е.

$$d\theta_{ж} = \theta_2 - \theta_4 = (G_2 - G_4) dt.$$

С учетом гидростатического давления  $P_r = \rho_{ж} g(l - h)$ , где  $g$  – ускорение свободного падения, для ПГИЭ выносного типа

$$d\theta_{ж} = [(\alpha_2 P_2 + \alpha_4 P_4 - \alpha_4 \rho_{ж} g l) + \alpha_4 \rho_{ж} g h - (\alpha_2 + \alpha_4) P_k] dt. \quad (1.25)$$

Таким образом,

$$\rho_{\text{ж}} S \frac{dh}{dt} = [(-\alpha_2 P_2 - \alpha_4 P_4 + \alpha_4 \rho_{\text{ж}} g l) - \alpha_4 \rho_{\text{ж}} g h + (\alpha_2 + \alpha_4) P_{\text{к}}]. \quad (1.26)$$

Уравнения (1.24) и (1.26) образуют систему дифференциальных уравнений относительно  $h$  и  $P_{\text{к}}$ .

$$\begin{cases} \frac{S}{RT} \left( h \frac{dP_{\text{к}}}{dt} + \bar{P}_{\text{к}} \frac{dh}{dt} \right) = \alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3 + (\alpha_1 + \alpha_3) P_{\text{к}}, \\ \rho_{\text{ж}} S \frac{dh}{dt} = [(-\alpha_2 P_2 - \alpha_4 P_4 + \alpha_4 \rho_{\text{ж}} g l) - \alpha_4 \rho_{\text{ж}} g h + (\alpha_2 + \alpha_4) P_{\text{к}}] \end{cases} \quad (1.27)$$

Если ПГИЭ погружного типа, то при заданных значениях давлений на входах дросселей  $D_1$  и  $D_3$ , уравнение (1.24), описывающее поведение газовой фазы, остается без изменений. В первом уравнении системы дифференциальных уравнений (1.27) необходимо учитывать глубину  $H$  погружения емкости измерительного элемента в жидкость, которое при этом будет иметь вид

$$\rho_{\text{ж}} S \frac{dh}{dt} = [(-\alpha_2 P_2 - \alpha_4 P_4 + \alpha_4 \rho_{\text{ж}} g (H - l)) - \alpha_4 \rho_{\text{ж}} g h + (\alpha_2 + \alpha_4) P_{\text{к}}]. \quad (1.28)$$

Введем обозначения коэффициентов системы уравнений (1.27), описывающей ПГИЭ выносного типа:

$$A = -\frac{\alpha_4 g}{S}, \quad B_1 = \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{\rho_{\text{ж}} S}, \quad C_1 = \frac{\alpha_4 \rho_{\text{ж}} g l - \alpha_2 P_2 - \alpha_4 P_4}{\rho_{\text{ж}} S}, \quad B_2 = -\frac{(\alpha_1 + \alpha_3) RT}{S}, \quad C_2 = \frac{(\alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3) RT}{S}$$

и погружного типа:

$$A = -\frac{\alpha_4 g}{S}, \quad B_1 = \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{\rho_{\text{ж}} S}, \quad C_1 = \frac{\alpha_4 P_{\alpha} - \alpha_2 P_2 - \alpha_4 \rho_{\text{ж}} g (H - l)}{\rho_{\text{ж}} S}, \quad B_2 = -\frac{(\alpha_1 + \alpha_3) RT}{S}, \quad C_2 = \frac{(\alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3) RT}{S},$$

где  $C_m = C_m(t)$ ,  $m = 1, 2$ , также  $P_i = P_i(t)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $A, B_1, B_2$  – постоянные;  $P_{\alpha}$  – давление над поверхностью жидкости.

Если на входах дросселей  $D_1$  и  $D_2$  заданы расходы  $G_1$  и  $G_2$  или их соответствующее сочетание с давлениями  $P_1$  или  $P_2$ , т.е.  $G_1$  и  $P_2$  или  $G_2$  и  $P_1$ , то вновь полученная система дифференциальных уравнений будет иметь вид системы (1.27) с соответствующими коэффициентами

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = Ah + B_1 P_{\text{к}} + C_1(t), \\ h \frac{dP_{\text{к}}}{dt} + P_{\text{к}} \frac{dh}{dt} = B_2 P_{\text{к}} + C_2(t). \end{cases} \quad (1.29)$$

Значения коэффициентов системы дифференциальных уравнений (1.29) для ПГИЭ погружного (ПТ) и выносного (ВТ) типов в зависимости от входных параметров приведены в табл. 1.1.

Система дифференциальных уравнений (1.29) относительно давления  $P_{\text{к}}$  в емкости  $V_{\text{к}}$  и высоты  $h$  газового пространства в общем виде не интегрируется в квадратурах.

Для измерений наибольший интерес представляют случаи, когда одно из значений  $\alpha_1, \alpha_3$  или  $\alpha_4$  стремятся к бесконечности. Тогда в системе (1.29) функция  $P_{\text{к}}$  известна, т.е.  $P_{\text{к}} = P_1$  при  $\alpha_1 = \infty$ ,  $P_{\text{к}} = P_3$  при  $\alpha_3 = \infty$ , для измерительных элементов выносного типа  $P_{\text{к}} = P_4 - P_{\Gamma}$  при  $\alpha_4 = \infty$ , здесь  $P_{\Gamma} = \rho_{\text{ж}} g (l - h)$  – гидростатическое давление. При этом в системе дифференциальных уравнений остается одно уравнение. Если  $\alpha_1 \rightarrow \infty$  или  $\alpha_3 \rightarrow \infty$ , то получим уравнение

$$\frac{dh}{dt} = Ah + B_1 P_{\text{ж}} + C_1(t),$$

решение которого имеет вид [50]

$$h(t) = h_0 e^{A(t-t_0)} + \int_{t_0}^t [B_1 P_{\text{ж}}(s) + C_1(s)] e^{-A(s-t)} ds.$$

**1.1. Коэффициенты системы дифференциальных уравнений (1.29) для ПГИЭ выносного (ВТ) и погружного (ПТ) типов**

Коэффициент и тип ПГИЭ	Входные параметры ПГИЭ			
	$P_1, P_2$	$G_1, P_2$	$G_1, G_2$	$P_1, G_2$
A (ВТ, ПТ)	$-\frac{\alpha_4 g}{S}$			
$B_1$ (ВТ, ПТ)	$\frac{\alpha_2 + \alpha_4}{\rho_{ж} S}$	$\frac{\alpha_4}{\rho_{ж} S}$		
$C_1(t)$ (ВТ)	$\frac{\alpha_4 \rho_{ж} g l - \alpha_2 P_2 - \alpha_4 P_4}{\rho_{ж} S}$	$\frac{\alpha_4 \rho_{ж} g l - G_2 - \alpha_4 P_4}{\rho_{ж} S}$		
$C_1(t)$ (ПТ)	$\frac{-\alpha_4 P_\alpha - \alpha_2 P_2 - \alpha_4 \rho_{ж} g (H - l)}{\rho_{ж} S}$	$\frac{-\alpha_4 P_\alpha - G_2 - \alpha_4 \rho_{ж} g (H - l)}{\rho_{ж} S}$		
$B_2(t)$ (ПТ)	$-\frac{(\alpha_1 + \alpha_3) RT}{S}$	$-\frac{\alpha_3 RT}{S}$	$-\frac{(\alpha_1 + \alpha_3) RT}{S}$	
$C_2(t)$ (ПТ)	$\frac{(\alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3) RT}{S}$	$\frac{(G_1 + \alpha_3 P_3) RT}{S}$	$\frac{(\alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3) RT}{S}$	

При  $\alpha_4 \rightarrow \infty$  имеем уравнение

$$h \frac{dP_k}{dt} + P_k \frac{dh}{dt} = B_2 P_k + C_2(t),$$

решением которого является [50]

$$h(t) = \frac{1}{P(t)} \left[ h_0 P_0 + \int_0^t (B_2 P_k(s) + C_2(s)) ds \right].$$

Обобщенная схема ПГИЭ и математическое описание процессов в газовой и жидкой фазе позволяют оценить влияние конструктивных и режимных параметров на процесс измерения вязкости.

**2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ ПРИ ПОДАЧЕ  
ПОСТОЯННОГО ДАВЛЕНИЯ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ**

**2.1. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ  
ИСТЕЧЕНИЯ В ВИСКОЗИМЕТРИИ**

В методах контроля вязкости жидкостей, в основу которых положен принцип истечения, о величине контролируемого параметра можно судить по времени истечения заданного объема жидкости через капилляр.

Операция измерения времени не представляет собой трудности и может быть осуществлена с высокой точностью простыми средствами. Проблемой измерения времени истечения в вискозиметрии является формирование сигналов о начале и окончании процесса истечения контролируемой жидкости.

При технических измерениях вязкости измерить время истечения возможно по времени изменения на фиксированную величину одного из параметров, определяющих состояние измерительного элемента в процессе ламинарного течения жидкости через капилляр.

В ряде производств нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и других отраслей промышленности нежелательно, а в некоторых случаях полностью исключено, применение электрических и фотоэлектрических времяизмерительных устройств [51 – 53]. В связи с этим возрастает необходимость в простых и надежных пневматических методах измерения времени истечения, обладающих повышенной пожаро- и взрывобезопасностью.

Рассмотрим пути измерения времени истечения контролируемой жидкости из измерительного элемента под действием избыточного давления. Приборы, использующие для вытеснения жидкости избыточное давление, имеют то преимущество, что одним и тем же прибором можно контролировать жидкости, вязкость которых изменяется в широком диапазоне, не удлинняя при этом чрезмерно время истечения для наиболее вязких жидкостей. Использование давления сжатого воздуха в измерительных элементах предполагает выполнение их в виде пневмогидравлических камер переменного объема выносного (рис. 1.3, а) или погружного (рис. 1.3, б) типов.

Значения коэффициентов системы дифференциальных уравнений (1.29) с учетом того, что  $\alpha_3$  и  $\alpha_2 = 0$ , а также  $P_1 = \text{const}$  получим из табл. 1.1:

– для измерительного элемента погружного типа в виде

$$A = -\frac{\alpha_4 g}{S}, \quad B_1 = \frac{\alpha_4}{\rho_{ж} S}, \quad C_1 = \frac{-\alpha_4 P_\alpha - \alpha_4 \rho_{ж} g (H - l)}{\rho_{ж} S},$$



$$B_2 = -\frac{\alpha_1 RT}{S}, \quad C_2 = \frac{\alpha_1 P_1 RT}{S};$$

– для измерительного элемента выносного типа

$$A = -\frac{\alpha_4 g}{S}, \quad B_1 = \frac{\alpha_4}{\rho_{ж} S}, \quad C_1 = \frac{-\alpha_4 P_{\alpha} + \alpha_4 \rho_{ж} g l}{\rho_{ж} S},$$

$$B_2 = -\frac{\alpha_1 RT}{S}, \quad C_2 = \frac{\alpha_1 P_1 RT}{S}.$$

Для измерительного элемента погружного типа систему дифференциальных уравнений (1.29) после подстановки соответствующих коэффициентов запишем в виде

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -\frac{\alpha_4 g}{S} h + \frac{\alpha_4}{S \rho_{ж}} P_{к} + \frac{-\alpha_4 P_{\alpha} - \alpha_4 \rho_{ж} g (H-l)}{S \rho_{ж}}, \\ P_{к} \frac{dh}{dt} = -\frac{\alpha_1 RT}{S} P_{к} + \frac{\alpha_1 RT}{S} P_1. \end{cases} \quad (2.1)$$

Учитывая, что  $\alpha_1 \rightarrow \infty$ , из второго уравнения системы дифференциальных уравнений (2.1) после преобразования получим  $P_{к} = P_1$ . Учитывая это, и принимая, что  $\frac{\alpha_4 g (H-l+h)}{S} \ll P_{к}$  из системы (2.1) выразим

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\alpha_4}{S \rho_{ж}} (P_{к} - P_{\alpha}). \quad (2.2)$$

Учитывая, что дроссель  $D_4$  выполнен в виде капиллярной трубки и режим течения по нему ламинарный, проводимость

$$\alpha_4 = \frac{\pi d_4^4 \rho_{ж}}{128 l_4 \eta_{ж}}, \quad \text{где } d_4, l_4 \text{ – диаметр и длина капиллярной трубки дросселя } D_4, \text{ уравнение (2.2) запишем в виде}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\pi d_4^4}{128 l_4 \eta_{ж} S} (P_{к} - P_{\alpha}). \quad (2.3)$$

Для измерительного элемента выносного типа система дифференциальных уравнений (1.12) после подстановки соответствующих коэффициентов примет вид

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -\frac{\alpha_4 g}{S} h + \frac{\alpha_4}{S \rho_{ж}} P_{к} + \frac{-\alpha_4 P_{\alpha} - \alpha_4 \rho_{ж} g l}{S \rho_{ж}}, \\ P_{к} \frac{dh}{dt} = -\frac{\alpha_1 RT}{S} P_{к} + \frac{\alpha_1 RT}{S} P_1. \end{cases} \quad (2.4)$$

При условии, что гидростатическое давление значительно меньше давления  $P_{к}$  в измерительной емкости и  $\alpha_1 \rightarrow \infty$ , из системы дифференциальных уравнений (2.4) получим уравнение (2.3).

Интегрируя уравнение (2.3) определим время изменения уровня в пределах от начального  $h_2$  до конечного  $h_1$  значений

$$t = \frac{128 l_4 S (h_2 - h_1)}{\pi d_4^4 (P_{к} - P_{\alpha})} \eta_{ж}. \quad (2.5)$$

Согласно уравнению (2.5), при истечении жидкости под действием избыточного давления возможно или истечение всей жидкости из измерительной емкости, при этом  $h_1 = 1$ , или некоторого ее объема, когда  $h_1 > 1$ .

После истечения всей жидкости из измерительной емкости  $D_4$  (рис. 1.3), продавливающий пневматический импульс выйдет из нее по капиллярной трубке 2, неся информацию об окончании истечения заданного объема. Существенное различие в скоростях течения жидкости и воздуха по капиллярной трубке положено в основу метода измерения времени истечения жидкости через капилляр [54], реализованного в ряде конструкций автоматических капиллярных вискозиметров [55, 56]. При неполном истечении поданного в измерительную емкость объема контролируемой жидкости измерение времени истечения рассмотренным выше методом невозможно.

В связи с тем, что истечение жидкости из измерительного элемента выносного типа сопровождается изменением его веса  $G_b$  на величину

$$\Delta G_b = \frac{\pi D^2}{4} \rho_{ж} g (h_2 - h_1), \quad (2.6)$$

то уравнение (2.5) с учетом (2.6) можно записать в виде

$$t = \frac{128 l_4 S \Delta G_b}{\pi d_4^4 (P_{к} - P_{\alpha}) \rho_{ж} g} \eta_{ж}.$$

Таким образом, существует принципиальная возможность измерения времени истечения контролируемой жидкости посредством измерения времени изменения веса измерительного элемента с жидкостью на постоянную величину.

В измерительных элементах погружного типа (рис. 1.3, б) объем  $V$  вытекшей жидкости замещается объемом поступившего газа. На измерительный элемент будет действовать выталкивающая сила  $F_b$ , изменение которой при истечении некоторого объема жидкости определяется уравнением

$$\Delta F_b = \frac{\pi D^2}{4} \rho_{ж} g (h_2 - h_1). \quad (2.7)$$

Подставляя в уравнение (2.5) значение  $\Delta h$  из выражения (2.7), получим

$$t = \frac{128l_4 S \Delta F_B}{\pi d_4^4 (P_k - P_a) \rho_{ж} g} \eta_{ж} \cdot \quad (2.8)$$

Как можно видеть из (2.8), время  $t$ , в течение которого выталкивающая сила изменит свою величину на некоторое постоянное значение  $\Delta F_B$  при истечении жидкости из измерительной емкости под действием избыточного давления, пропорционально времени истечения постоянного объема контролируемой жидкости, следовательно, и ее вязкости.

Измерение времени истечения постоянного объема контролируемой жидкости посредством измерения времени изменения выталкивающей силы, действующей на погруженный измерительный элемент, используется в автоматических устройствах контроля вязкости жидких веществ в реакционных аппаратах [57 – 60].

## 2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КАПИЛЛЯРНЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ И ОБЩИЙ ПОДХОД К ИХ РАЗРАБОТКЕ

подавляющее большинство пневмогидравлических систем аналитического контроля являются аналоговыми. В них циркулируют непрерывные сигналы, параметром которых является давление или расход сжатого воздуха. Пневматическая система передачи непрерывных сигналов имеет три особенности [41].

Первая особенность заключается в том, что сигнал считается переданным тогда, когда разница между передаваемым и воспринимаемым давлением окажется меньше, чем допустимая погрешность. В реальных пневматических системах управления скорость потока воздуха в линиях передачи весьма далека от скорости звука, фазовый сдвиг между передаваемым и воспринимаемым давлениями оказывается существенным. Так, например, время передачи давления между двумя приборами системы «Старт» при правильно выбранном диаметре соединительной линии и ее длине 300 м составляет 43 с [42].

Второй особенностью является зависимость погрешности передачи сигналов от качества выполнения линий. Каждое из соединений обладает негерметичностью, имеющей тенденцию к возрастанию в процессе эксплуатации системы.

Третьей отличительной особенностью является отсутствие необходимости преобразования сигнала, связанной с передачей его по линии связи, т.е. в установившемся режиме давление для рассматриваемой системы должно быть одинаковым во всех точках линии передачи. Это главное качество по существу является причиной возникновения первых двух названных выше отличительных черт рассматриваемой системы.

Одним из путей понижения погрешности при передаче информации, вследствие влияния изменения параметров линии связи, является широко используемый метод интенсивности. Примером такого преобразования является использование усилителей в устройствах формирования канала связи.

Большая точность работы измерительных систем достигается представлением и передачей сигналов в цифровом двоичном коде. Однако комплексные цифровые пневматические измерительные системы, как правило, оказываются сложными.

Более простыми в реализации являются импульсные методы получения сигналов. При передаче импульсных сигналов уменьшаются искажения по сравнению с передачей аналоговых сигналов. В некоторых случаях при использовании импульсных методов с большей точностью выполняются и сами измерения.

В импульсных пневматических системах контроля сигналы преобразуются следующим образом. В измерительном элементе или в соединенном с ним преобразователе получают импульсы давления, параметры которых отражают значение измеряемой величины. На конце линии импульсный сигнал может быть преобразован в аналоговый или цифровой.

Методы получения импульсных пневматических сигналов можно разделить на две группы:

- методы получения импульсных сигналов в процессе измерения, основанные на использовании в каждом случае особых физических явлений;
- универсальные методы получения импульсных сигналов, основанные на преобразовании получаемого в измерительном преобразователе аналогового сигнала в импульсный с помощью соединяемого с измерительным преобразователем устройства.

Несмотря на то, что методы второй группы находят широкое применение, наибольший интерес при разработке методов и средств контроля производственных процессов представляют методы первой группы.

Аналитический контроль веществ в технологических аппаратах целесообразно проводить, совмещая операции пробоотбора и измерения [90]. Выполнение таких операций осуществляется циклически, что определяет целесообразность применения импульсного метода контроля, при котором информация о контролируемой величине заключена в параметрах импульсной последовательности.

Актуальным также является поиск новых методов импульсного контроля на основе новых физических процессов, происходящих в пневмогидравлических первичных преобразователях соответствующих конструкций.

Принцип действия вискозиметров истечения основан на зависимости средней скорости установившегося потока жидкости, вытекающей из калиброванной капиллярной трубки или отверстия, от ее вязкости.

Определение вязкости производится при определенном расходе жидкости по перепаду давления на капилляре или по времени истечения заданного ее объема.

Вискозиметры истечения могут быть:

- капиллярные (с истечением через капиллярную трубку);
- эффузионные (с истечением через отверстие или некапиллярную трубку).

В зависимости от устройства вискозиметра истечения вещество может истекать либо под действием внешнего давления, либо без него, только под действием гидростатических сил. Следует отметить, что капиллярные вискозиметры автоматического действия могут выполняться как выносного, так и погружного типа. Отличие капиллярных вискозиметров погружного и выносного типов заключается только в совокупности сил, действующих в системе «измерительный преобразователь – контролируемая жидкость»

За исключением капиллярных без давления все типы вискозиметров истечения выполняются как в виде лабораторных приборов спорадического действия, так и в виде автоматических приборов повторно-циклического или непрерывного действия.

Градуировка вискозиметров усложняется обстоятельством, что не существует воспроизводимой жидкости, обладающей достаточно высокой вязкостью. Вязкость, например, как глицерина, так и касторового масла лежит в подходящих для этой цели пределах, но вязкость глицерина слишком сильно зависит от малейших колебаний в процентном содержании воды, а касторовое масло вообще представляет собой недостаточно определенное вещество. Поэтому вязкость жидкости, употребляемой при градуировке вискозиметров необходимо измерять в абсолютном вискозиметре.

Эффузионные вискозиметры истечения не могут быть проградуированы в абсолютных единицах вязкости. Результаты измерений в них выражаются в условных единицах вязкости («градусах»), различных для приборов различной конструкции. Эти единицы характеризуют длительность истечения пробы. Ввиду простоты работы с эффузионными вискозиметрами истечения и их надежности они широко применяются в промышленности. Приборы имеют широкий диапазон измерений, однако уступают капиллярным вискозиметрам по точности.

На выходной сигнал капиллярных вискозиметров оказывает действие ряд параметров, изменение которых отрицательно влияет на точность измерения. Существенное влияние на результат измерения оказывают:

- измерение температуры контролируемой жидкости;
- изменение уровня жидкости в технологическом аппарате;
- изменение давления над поверхностью жидкости;
- изменение давления или расхода газа, подаваемого внутрь измерительной емкости преобразователя в процессе измерения;
- неточности заполнения и опустошения измерительной емкости;
- изменение диаметра капиллярной трубки истечения вследствие образования на ее поверхности пленки;
- концевые эффекты;
- динамические изменения, определяемые скоростью изменения контролируемого параметра и продолжительностью процесса измерения.

Вискозиметры, позволяющие измерять вязкость в абсолютных единицах, делятся на первичные и вторичные. В первичных вискозиметрах очень точно определяются размеры элементов, определяющих течение жидкости, объем протекшей жидкости и напряжение. Они служат для измерения вязкости, как правило, калибровочных жидкостей и при проведении весьма точных измерений. Первичные абсолютные вискозиметры сложны по устройству и служат в основном для специальных физико-химических исследований.

Для практических целей пользуются вторичными вискозиметрами, в которых вязкость измеряется путем сравнения скорости течения измеряемой жидкости с эталонной, вязкость которой определена в первичном вискозиметре.

При практических измерениях с помощью вторичных капиллярных вискозиметров обычно пренебрегают поправками на концевые эффекты, при условии, что возникающая при этом ошибка была не слишком велика, и чтобы длина капилляров была достаточно большой. Барр Г. в [15] рекомендует выбирать капилляр с размерами, удовлетворяющими неравенству  $l_k/d_k > 130$ . Необходимо обеспечивать плавные переходы из измерительной емкости в капилляр и выхода из него. Последнее особенно важно для предотвращения образования турбулентности при течении маловязких жидкостей. Кроме указанного, чтобы избежать возникновения турбулентности, необходимо соблюдать следующее условие [73]:

- при истечении жидкости под действием гидростатических сил

$$r_k^3/l_k \leq 2 \operatorname{Re}_{\text{кр}} v_{\text{ж}}^2 / gh,$$

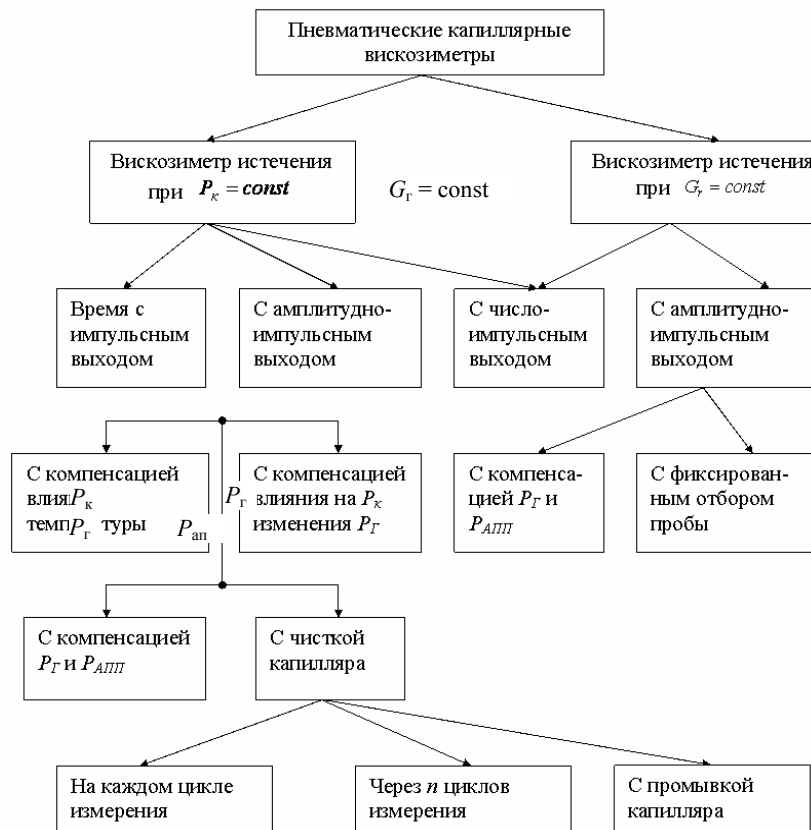
- при истечении жидкости под действием избыточного давления  $P_k$

$$r_k^3/l_k \leq 2 \operatorname{Re}_{\text{кр}} \eta_{\text{ж}}^2 / \rho_{\text{ж}} P_k.$$

В пневматических капиллярных вискозиметрах автоматического действия совмещены функции пробоотборного и измерительного устройств.

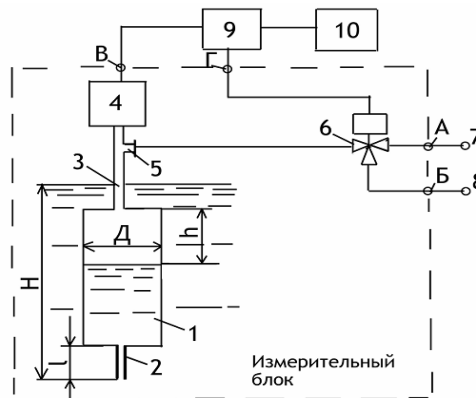
Классификация погружных пневматических капиллярных вискозиметров приведена на рис. 2.1. Конструкции вискозиметров классифицированы по следующим основным признакам: – по входному параметру газа в измерительной емкости; – по виду выходного сигнала; – по неконтролируемому параметру, компенсированному в соответствующей конструкции.

На рис. 2.2 изображена обобщенная функциональная схема автоматических погружных капиллярных устройств измерения вязкости. Такая схема справедлива практически для всех разработанных вискозиметров [55, 58, 62 – 72], кроме устройств с аэродинамической индикацией окончания истечения заданного объема контролируемой жидкости.



**Рис. 2.1. Классификация погружных пневматических капиллярных вискозиметров**

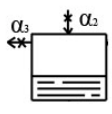

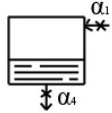
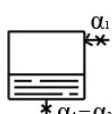
Измерительная емкость 1 погружена в контролируемую жидкость. В нижней части емкости 1 размещена калиброванная капиллярная трубка 2, а в верхней – газоподводящая трубка 3. Измерительная емкость связана с преобразователем 4 газоподводящей трубкой 3. Вытеснение контролируемой жидкости из измерительной емкости по капиллярной трубке истечения осуществляется подачей избыточного давления  $P_1$  или постоянного расхода газа  $G_1$  из трубопровода 7 через трехходовой кран 6 и штуцер 5 на газоподводящей трубке. После вытеснения жидкости производят переключение крана 6, подавая в полость измерительной емкости из трубопровода 8 давление  $P_3$ , значение которого ниже давления в технологическом аппарате, осуществляя заполнение измерительной емкости новой дозой контролируемой жидкости.



**Рис. 2.2. Обобщенная функциональная схема автоматических погружных капиллярных устройств измерения вязкости**

Все процессы, происходящие в измерительном преобразователе ИП, описываются системой дифференциальных уравнений (1.12) с коэффициентами, указанными в табл. 2.1, соответствующими реализуемым при измерении операциям.

## 2.1. Коэффициенты системы дифференциальных уравнений (1.12), соответствующие реализуемым при измерении операциям

Схема ИП	Операция реализуемая ИП	Значение коэффициентов системы уравнений	
		при $P_1 = \text{const}$	при $G_1 = \text{const}$
	Заполнение контролируемой среды (отбор пробы)	$A = 0, B_1 = \frac{\alpha_2}{\rho_{ж} S};$ $C_1 = -\frac{\alpha_2 P_2}{\rho_{ж} S};$ $B_2 = \frac{-\alpha_3 RT}{S};$ $C_2 = \frac{\alpha_3 P_3 RT}{S}$	$A = 0, B_1 = \frac{\alpha_2}{\rho_{ж} S};$ $C_1 = -\frac{\alpha_2 P_2}{\rho_{ж} S};$ $B_2 = \frac{-\alpha_3 RT}{S};$ $C_2 = \frac{\alpha_3 P_3 RT}{S}$
	Фиксация окончания неполного заполнения или опустошения ИП	$A = 0; B_1 = 0;$ $C_1 = 0; B_2 = 0;$ $C_2 = 0$	$A = 0; B_1 = 0;$ $C_1 = 0; B_2 = 0;$ $C_2 = 0$
Схема ИП	Операция реализуемая ИП	Значение коэффициентов системы уравнений	
		при $P_1 = \text{const}$	при $G_1 = \text{const}$
	Вытеснение жидкости (процесс измерения)	$A = -\alpha_4 g / S;$ $B_1 = \alpha_4 / \rho_{ж} S;$ $C_1 = \frac{\alpha_4 (\rho_{ж} g l - P_4)}{\rho_{ж} S};$ $C_2 = \frac{\alpha_1 R T P_1}{S};$ $B_2 = -\frac{\alpha_1 R T}{S}$	$A = -\alpha_4 g / S;$ $B_1 = \alpha_4 / \rho_{ж} S;$ $C_1 = \frac{\alpha_4 (\rho_{ж} g l - P_4)}{\rho_{ж} S};$ $C_2 = \frac{G_1 R T}{S};$ $B_2 = 0$
	Сигнализация окончания вытеснения жидкости при полном опустошении ИП	$A = 0; B_1 = 0; C_1 = 0;$ $B_2 = \frac{-(\alpha_1 + \alpha_3) R T}{S};$ $C_2 = \frac{(\alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3) R T}{S}$	$A = 0; B_1 = 0;$ $C_1 = 0; B_2 = 0;$ $C_2 = \frac{G_1 R T}{S}$

## 2.3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ИНДИКАЦИЕЙ МОМЕНТА ОКОНЧАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

### 2.3.1. Автоматический капиллярный вискозиметр выносного типа

Для измерения вязкости чаще всего применяют наиболее простые и дешевые капиллярные вискозиметры, принцип действия которых основан на зависимости вязкости от времени истечения постоянного объема жидкости. Эти приборы являются, как правило, лабораторными. Основная трудность при создании таких измерительных устройств – конструктивная реализация операции измерения времени истечения. В лабораторном полуавтоматическом вискозиметре ВЛК-1 впервые автоматизирован процесс измерения времени истечения анализируемой жидкости. К недостаткам вискозиметра ВЛК-1 можно отнести узкий диапазон измерения, длительный цикл измерения, а также использование его только во взрывобезопасных условиях.

В [55] предложен автоматический капиллярный вискозиметр, в котором используется действие избыточного давления для продавливания жидкости и время истечения измеряется пневматическим методом. В этой конструкции устранены указанные выше недостатки.

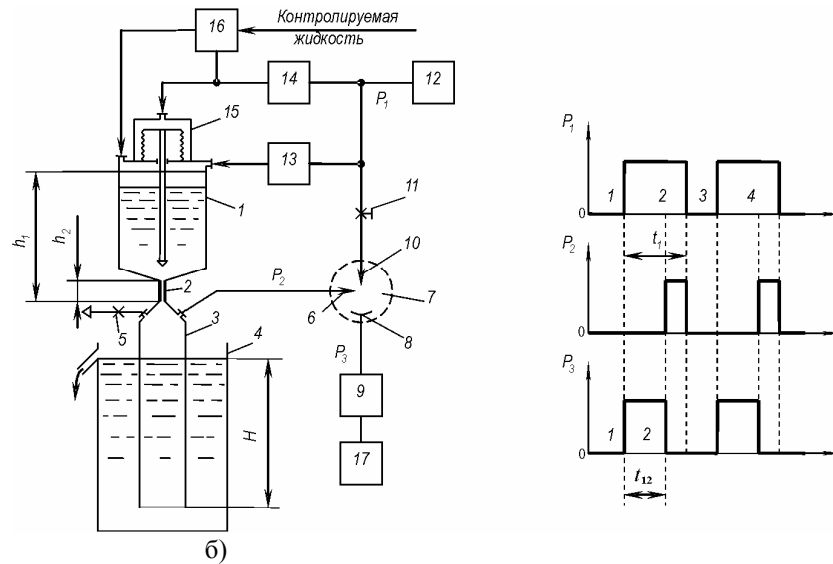
Реализуемый при измерении принцип позволяет одним и тем же прибором контролировать жидкости различной вязкости, не увеличивая при этом время истечения для наиболее вязких жидкостей.

Пневматический метод измерения времени истечения жидкости через капилляр не исключает использование электрических, фотоэлектрических и других измерительных устройств [51 – 53].

На рис. 2.3 представлены схема автоматического капиллярного вискозиметра (а) [55], в котором реализован пневматический метод измерения времени истечения жидкости [54], и циклограмма его работы (б).

Контролируемая жидкость поступает в сосуд 1, соединенный капиллярной трубкой истечения 2 с камерой 3 гидравлического затвора, выполненного в виде трубки, погруженной в сосуд 4 с постоянным уровнем. Гидравлический затвор снабжен двумя штуцерами, к одному из которых подключен дроссель 5, к другому – канал управления 6 струйного моностабильного усилителя 7 выполняющего логическую функцию «НЕ» и являющимся пневматическим аналогом

фотоэлемента. Приемный канал 8 струйного элемента 7 соединен с измерителем длительности пневматического импульса 17 через пневмоэлектрический преобразователь 9. Канал



**Рис. 2.3. Принципиальная схема автоматического капиллярного вискозиметра (а) и временная диаграмма его работы (б)**

питания 10 через дроссель 11 подключен к выходу генератора пневматических прямоугольных импульсов 12, выход которого через повторитель 13 соединен с камерой 1 и через инвертор 14 с запорным устройством 15 и насосом-дозатором 16.

Пусть на поверхность жидкости, находящейся в сосуде 1, подан пневматический импульс прямоугольной формы давлением  $P_1$ . В момент времени  $t = 0$  уровень жидкости в сосуде 1 равен  $h_1$ . За время  $dt$  через капиллярную трубку 2 из сосуда 1 вытечет объем жидкости  $dV$ , определяемый для ламинарного режима течения жидкости по капилляру из уравнения Пуазейля

$$dV = \frac{\pi d_k^4}{128 \eta_{ж} l_k} [P_1 + \rho_{ж} g h] dt, \quad (2.9)$$

где  $h$  – уровень жидкости в сосуде 1.

За тот же промежуток времени  $dt$  уровень  $h$  уменьшится на  $dh$ , причем изменение объема можно выразить формулой

$$dV = \frac{1}{4} \pi d_2^2 dh, \quad (2.10)$$

где  $d_2$  – внутренний диаметр сосуда 1.

Уменьшение объема жидкости в сосуде равно объему жидкости, вытекающей по капиллярной трубке. Приравняв уравнения (2.9) и (2.10), получим

$$dt = \frac{32 \eta_{ж} l_k d_2^2}{d_k^4 (P_1 + \rho_{ж} g h)} dh. \quad (2.11)$$

Интегрируя (2.11) в пределах от  $h_1$  до  $h_2 = 1$  при условии  $P_1 \gg \rho_{ж} g h$ , получим

$$t = \frac{32 l \Delta h d_2^2}{d_k^4 P_1} \eta_{ж}, \quad (2.12)$$

где  $\Delta h = h_1 - h_2$ .

Ввиду небольшого времени истечения объема жидкости  $V_1$ , находящегося в капиллярной трубке, им можно пренебречь. После истечения всего объема контролируемой жидкости, пневматический продавливающий импульс выйдет по капиллярной трубке из сосуда 1.

Работает автоматический капиллярный вискозиметр следующим образом. Пусть на выходе генератора пневматических импульсов 12 давление  $P_1 = 0$ . Этим давлением, после его инвертирования, прикрывается вход трубки истечения посредством сжатия сильфона запорного блока 15, и насосом-дозатором 16 подается в сосуд 1 постоянный объем контролируемой жидкости.

Единичный импульс  $P_1 = 1$  через повторитель 13 поступает в сосуд 1 и передвигает контролируемую жидкость в камеру 3 через капиллярную трубку 2. Вход трубки 2 освобождается при снятии давления с запорного сильфонного блока 15 за счет избыточного давления в сосуде 1 и упругости сильфона. Подачей инвертированного импульса  $P_1 = 1$  на вход управляющей системы насоса-дозатора подготавливается новая доза контролируемой жидкости.

Давление импульса  $P_1 = 1$  является давлением питания струйного усилителя 7, так как через дроссель 11 сжатый воздух подается на вход канала питания 10, откуда струя газа попадает на вход канала 8 и, преобразуясь в 9, включает измеритель времени 17.

После истечения всего объема контролируемой жидкости из сосуда 1 по капиллярной трубке 2 сжатый воздух продавливающего импульса поступит через камеру 3 в канал управления 6 струйного усилителя 7. Под действием управляющего сигнала  $P_2$  питающая струя отклоняется и на выходе приемного канала 8 будет давление  $P_2 = 0$ . Измеритель времени 17 отключается и фиксирует время, которое является временем истечения жидкости, функционально связанным уравнением (2.12) с вязкостью контролируемой жидкости.

Мерой вязкости анализируемой жидкости в описанном устройстве является отрезок времени  $t_{12}$  (рис. 2.3, б), заключенный между началом действия продавливающего импульса и моментом его появления на выходе канала управления 6 струйного элемента 7.

Для исключения температурной погрешности сосуд 1, трубка истечения 2 и дозирующая камера насоса 16 с участком трубопровода, соединенного с сосудом 1, термостатируются (термостатирующее устройство на рисунке не показано).

Диапазон измерения может быть существенно расширен путем изменения геометрических размеров прибора, а также выбором необходимого значения давления пневматического продавливающего импульса.

### 2.3.2. Устройство для измерения вязкости жидкости в технологических аппаратах

Первичный измерительный преобразователь при работе устройства в режиме автоматического контроля выполняет функцию, как первичного измерительного преобразователя, так и ряд других вспомогательных функций (пробоотбор, сигнализация и др.), осуществления контроля без которых было бы невозможным.

Рассмотрим конструкцию (рис. 2.4) и принцип действия капиллярного погружного автоматического вискозиметра [74], реализующего пневматический метод измерения времени истечения жидкости через капилляр [54]. До настоящего времени указанный метод измерения времени был реализован только в устройствах переносного типа для измерения вязкости жидких веществ [55, 56].

Измерительный блок 7 погружен в контролируемую жидкость 4, находящуюся в закрытом аппарате 6. Измерительная емкость 2 с капиллярной трубкой 1 истечения жестко закреплена на аппарате 6. В верхней части емкости 2 расположен тарельчатый клапан 3, соединенный газоподводящей трубкой 5 с подвижным дном 8 сильфонного блока 13. Первый вход 12 сильфонного блока 13 подключен к входу 11 блока 10 управления и к входу вторичного прибора 9. Блок 10 управления выполнен из элементов УСЭППА [23, 40] и содержит (см. рис. 2.5) сумматор 18 (ПЭС.3), входы которого соединены с задатчиком 17 (П23Д.3) и с входом 16, соединенным с газовой полостью над контролируемой жидкостью в аппарате 6.

Выход сумматора 18 подключен к соплу реле 19 (П1Р.1), представляющего собой нормально открытый клапан, управляющий вход которого подключен к входу триггера 22 с раздельными входами, выполненном на основе реле с фиксированным начальным положением (П1Р.2), к входу 11 блока управления и к входу импульсатора 24, содержащего реле (П1Р.1), дроссель (П2Д.2), и пневматическую емкость (ПОЕ-50). Выход импульсатора подключен к входу 23 триггера 22. Вход 21 триггера 22 подключен к выходу инвертора 20 (реле П1Р.1), с входом которого соединен выход пневматического реле 19 и выход 15 блока 10 управления.

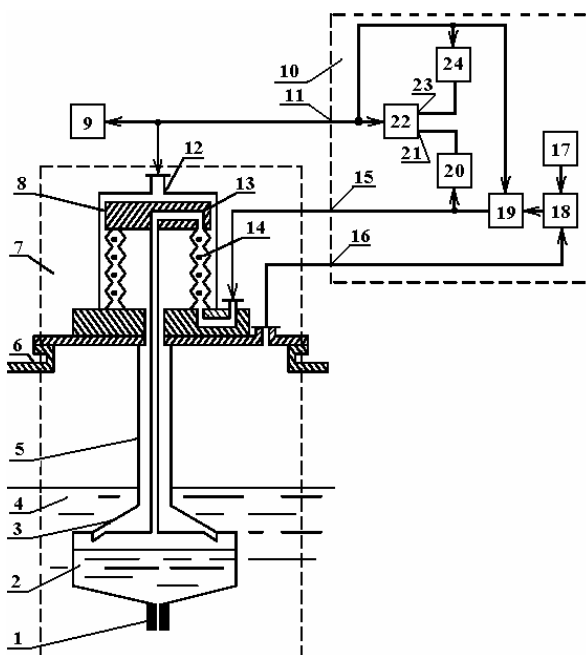


Рис. 2.4. Устройство для автоматического контроля вязкости жидкостей в реакционном аппарате

Выход 15 блока 10 подключен в пространство 14 между сильфонами, которое в свою очередь через трубку 5 соединено с измерительной емкостью 2.

Процессы, происходящие в измерительном преобразователе с жесткими стенками, описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = Ah + B_1 P_k + C_1, \\ P_k \frac{dh}{dt} + h \frac{dP_k}{dt} = B_2 P_k + C_2, \end{cases} \quad (2.13)$$

где  $A$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  – коэффициенты, значения которых определяются конструктивными параметрами измерительного преобразователя и свойствами жидкой и газообразной фаз на входах приведены в таблице;  $P_k$  – абсолютное давление газа в измерительной емкости;  $h$  – высота газового пространства в емкости измерительного преобразователя.

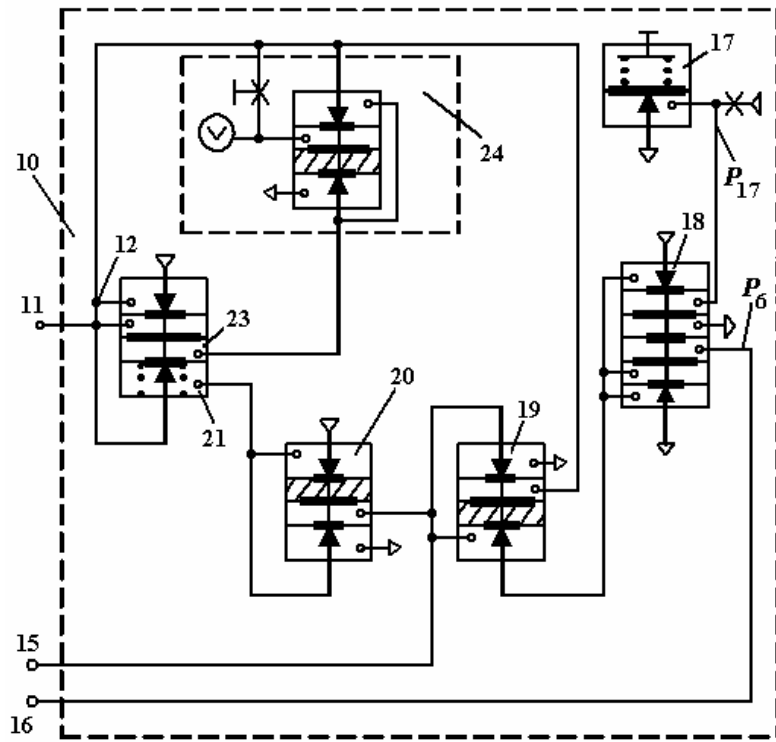


Рис. 2.5. Принципиальная пневматическая схема блока управления устройства для автоматического контроля вязкости



**2.2. ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ (2.13) ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ РАЗЛИЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ**

Операции	Схема измерительного преобразователя	Коэффициенты системы
Процесс вытеснения жидкости (измерение)		$A = \frac{-\alpha_4 g}{S}; \quad B_1 = \frac{\alpha_4}{\rho_{ж} S}$ $C_1 = \frac{\alpha_4 (\rho_{ж} g l - P_4)}{\rho_{ж} S};$ $C_2 = \frac{\alpha_1 R T P_1}{S}; \quad B_2 = -\frac{\alpha_1 R T}{S}$
Сброс давления из емкости и фиксация окончания измерения		$A = 0; \quad B_1 = 0; \quad C_1 = 0;$ $B_2 = -\frac{(\alpha_1 + \alpha_3) R T}{S}$ $C_2 = \frac{(\alpha_1 P_1 + \alpha_3 P_3) R T}{S}$
Отбор пробы (заполнение ИП жидкостью)		$A = 0; \quad B_1 = \frac{\alpha_2}{\rho_{ж} S};$ $C_1 = \frac{\alpha_2 P_2}{\rho_{ж} S}; \quad B_2 = -\frac{\alpha_3 R T}{S}$ $C_2 = \frac{\alpha_3 P_3 R T}{S}$
Фиксация окончания процесса отбора пробы		$A = 0; \quad B_1 = 0; \quad C_1 = 0;$ $B_2 = 0; \quad C_2 = 0$

Примечание:  $P_1, P_2, P_3, P_4$  – давление на входах соответствующих дросселей;  $S$  – площадь сечения емкости измерительного преобразователя;  $l$  – высота емкости измерительного преобразователя;  $\alpha_1, \alpha_3$  – проводимости дросселей для подачи и сброса газа;  $\alpha_2, \alpha_4$  – проводимости дросселей для подачи и сброса жидкости.

Пусть в начальный момент времени жидкость заполняет емкость измерительного преобразователя и под действием давления вытекает из нее по капиллярной трубке истечения. Давление, под действием которого вытекает жидкость, определяется уравнением

$$P_k = P_{17} + P_6,$$

где  $P_{17}$  – давление на выходе датчика 17;  $P_6$  – давление в аппарате с контролируемой жидкостью.

Процессы, происходящие в измерительного преобразователя при вытеснении жидкости, описываются системой дифференциальных уравнений (2.13), которую после подстановки соответствующих коэффициентов запишем в виде

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -\frac{\alpha_4 g h}{S} + \frac{\alpha_4}{\rho_{ж} S} P_k + \frac{\alpha_4 (\rho_{ж} g l - P_4)}{\rho_{ж} S}, \\ P_k \frac{dh}{dt} + h \frac{dP_k}{dt} = -\frac{\alpha_1 R T}{S} P_k + \frac{\alpha_1 R T}{S} P_1. \end{cases} \quad (2.14)$$

Так как  $\alpha_1$  проводимость газопроводящей трубки 5 при течении по ней газа велика, то  $P_k = P_1$  и  $P_4 = \rho_{ж} g h + P_{ан}$ , где  $H$  – глубина погружения измерительного элемента;  $P_{ан}$  – давление в аппарате.

Из первого уравнения системы (2.14) получим

$$S \frac{dh}{dt} = \alpha_4 \left( \frac{P_1}{\rho_{ж}} - g h - g(h-l) - \frac{P_{ан}}{\rho_{ж}} \right),$$

но так как

$$\frac{P_1}{\rho_{ж}} - g(H-l) - \frac{P_{ан}}{\rho_{ж}} = K = \text{const},$$

то

$$\frac{dh}{dt} + \frac{\alpha_4 g}{S} h = \frac{\alpha_4}{S} K. \quad (2.15)$$

Решая уравнение (2.15) относительно времени истечения  $\tau_n$  дозы контролируемой жидкости соответствующей изменению уровня  $h$  от 0 до  $l$  получим

$$\tau_{и} = \frac{S}{\alpha_4 g} \ln \left| 1 + \frac{\rho_{ж} g l}{P_1 - (P_{ап} + \rho_{ж} g h)} \right|. \quad (2.16)$$

Учитывая, что при ламинарном режиме течения жидкости по капиллярной трубке 1 ее проводимость без учета краевых эффектов

$$\alpha_4 = \frac{\pi g_1^4 \rho_{ж}}{128 \eta_{ж} l_1},$$

где  $d_1, l_1$  – диаметр и длина капиллярной трубки истечения 1, уравнение (2.16) запишем в виде

$$\tau_{и} = \frac{128 S l_1}{\pi d_1^4 g \rho_{ж}} \eta_{ж} \ln \left| 1 + \frac{\rho_{ж} g l}{P_1 - (P_{ап} + \rho_{ж} g h)} \right|. \quad (2.17)$$

После того, как вся жидкость вытечет из емкости 2, по капиллярной трубке 1 пойдет воздух. Проводимость трубки 1 при прохождении по ней воздуха  $\alpha_4 = \alpha_3$  будет большой, т.е.  $\alpha_4 \rightarrow \infty$  поэтому давление  $P_k$  в емкости 2 быстро уменьшится, время разгрузки  $\tau_p \rightarrow 0$ , и примет значение

$$P_k = \rho_{ж} g H + P_6 = P_{кн}.$$

Сбросом давления из емкости 2 сигнализируется окончание процесса истечения дозы контролируемой жидкости.

Давление  $P_{кн}$  поступает из емкости 2, на вход инвертора 20, на выходе которого при этом появляется сигнал единичного уровня  $P_{20} = 1$ . Сигналом  $P_{20} = 1$  триггер 22, с отдельными входами переводится в состояние с выходным давлением  $P_{22} = 1$ , которое поступает на вход управления реле 19 и запрещает прохождения давления  $P_{18}$  в полость измерительной емкости 2.

Давление  $P_{22}$  поступает на вход 12 сильфонного блока 13 и перемещает его жесткое дно 8. Это перемещение передается посредством газоподводящей трубки 5 тарельчатому клапану 3, который при этом перемещается вниз и открывает доступ контролируемой жидкости в полость измерительной емкости 2.

Измерительная емкость 2 заполняется контролируемой жидкостью, причем процесс заполнения описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = \frac{\alpha_2}{\rho_{ж} S} (P_k - P_2), \\ P_k \frac{dh}{dt} + h \frac{dP_k}{dt} = \frac{\alpha_3 RT}{S} (P_3 - P_k). \end{cases} \quad (2.18)$$

Тарельчатый клапан 3 имеет большое проходное сечение, проводимость которого  $\alpha_2$  можно принять равной бесконечности, поэтому из первого уравнения системы (2.18)

$$P_k = P_2,$$

а второе уравнение примет вид

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{\alpha_3 RT}{S P_2} (P_2 - P_3). \quad (2.19)$$

Так как  $P_2 = P_{г1} = P_6$ , где  $P_{г1} = \rho_{ж} g H_1$  – гидростатическое давление на уровне  $H_1$  погружения тарельчатого клапана, то решение уравнения (2.19) позволяет определить время  $\tau_3$  заполнения контролируемой жидкостью емкости 2 через тарельчатый клапан 3, т.е.

$$\tau_3 = \frac{I S P_2}{\alpha_3 RT (P_2 - P_3)}. \quad (2.20)$$

Давление  $P_{22} = 1$  поступает на вход импульсатора 24, который срабатывает через время  $\delta\tau$  и на вход 23 триггера 22 поступит сигнал единичного уровня, которым триггер переводится в состояние с нулевым выходным сигналом. Нулевой сигнал с выхода триггера снимает запрет с реле 19 на подачу давления с выхода сумматора 18 в полость измерительной емкости 2.

Время фиксации  $\tau_{ф}$  определяется в основном разностью времени сдвига переднего фронта импульса  $P_{22} = 1$  импульсатором 24 и времени  $\tau_3$  заполнения емкости 2 контролируемой жидкостью, т.е.

$$\tau_{ф} = \delta\tau - \tau_3.$$

Под действием давления, поступающую в измерительную емкость 2, и пружины, установленной в сильфонном блоке 13, при поступлении на вход 12 сильфонного блока давление нулевого уровня, тарельчатый клапан 3 закрывается. Течение жидкости и газа по дросселям при этом отсутствует.

Вновь жидкость вытесняется в технологический аппарат поступившим в емкость давлением  $P_k$  через капиллярную трубку истечения. Дальнейшая работа устройства осуществляется аналогично рассмотренному выше.

Операции отбора пробы, фиксации окончания процесса отбора пробы, сигнализация окончания процесса измерения направлены на обеспечение работоспособности измерительного устройства.

Общее время одного цикла измерения  $\tau_{ц} = \tau_{и} + \delta\tau$  с учетом (2.17) определяется вязкостью контролируемой жидкости при постоянстве других величин входящих в уравнение.

## 2.4. КОНТРОЛЬ ВЯЗКОСТИ ПО ВРЕМЕНИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

### 2.4.1. Устройство для измерения вязкости с времяимпульсным выходным сигналом

Главной трудностью при создании автоматических капиллярных вискозиметров, основанных на дозировании и предназначенных для работы непосредственно в реакционном аппарате, является измерение времени прохождения определенного количества контролируемой жидкости по капилляру. В силу того, что большинство производств химической, нефтехимической, лакокрасочной и ряде других отраслей промышленности являются пожаро- и взрывоопасными, практически полностью исключается применение электрических и фотоэлектрических устройств.

В известных пневматических устройствах для измерения вязкости [54 – 56] реализуются пневматические методы измерения времени истечения постоянного объема жидкости через капилляр. Однако эти устройства имеют ряд недостатков. Они не могут быть применены для измерения вязкости непосредственно в реакционных аппаратах. Точность измерения такими устройствами зависит от количества жидкости, остающейся на стенках измерительного устройства после истечения. При помощи таких устройств невозможно при необходимости получить информацию о скорости истечения дозы контролируемой жидкости.

Рассмотрим конструкцию и принцип действия автоматического капиллярного вискозиметра [57, 60], скорость истечения жидкости в котором определяется по скорости изменения выталкивающей силы, действующей на измерительный элемент.

Принципиальная схема автоматического устройства для измерения вязкости приведена на рис. 2.6.

Устройство состоит из измерительного элемента, содержащего измерительный сосуд 1 и капилляр 2, соединенного газоподводящей трубкой 3 с преобразователем силы в давление 4 типа ПП-1. Выход преобразователя 4

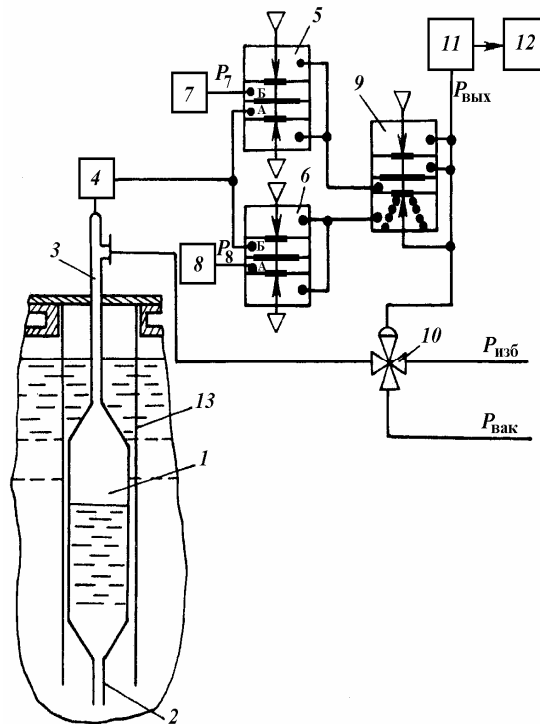


Рис. 2.6. Принципиальная схема автоматического капиллярного вискозиметра погружного типа

подключен к камере А элемента сравнения 5 типа П2ЭС.1 и камере Б элемента сравнения 6. К камере Б элемента 5 и камере А элемента 6 подключены соответственно задатчики давлений 7 и 8 типа П2ЗД.3. Выходы элементов сравнения подключены к входам триггера 9 с отдельными входами, реализованном на пневматическом реле П1Р.3. Выход триггера 9 соединен с исполнительным механизмом трехходового клапана 10 (774-3-00) и с входом генератора линейно нарастающего давления 11, выход которого подключен к вторичному регистрирующему прибору 12 типа (ПВ 4.1П). Чувствительный элемент помещен в защитный кожух 13 для предохранения от механических повреждений и исключения динамического воздействия потоков жидкости.

На чувствительный элемент, погруженный в контролируемую жидкость, действует выталкивающая сила

$$F_v = (\rho_{ж} - \rho_{г})gV,$$

где  $V$  – объем измерительного элемента, не занятый жидкостью.

Сила  $F$ , передаваемая при помощи газоподводящей трубки 3 на вход чувствительного элемента преобразователя силы 4, равна

$$F = G_v - F_v,$$

где  $G_v$  – вес измерительного элемента с газоподводящей трубкой.

Пусть в начальный момент жидкость в полости измерительного сосуда 1 отсутствует. На вход преобразователя 4 воздействует минимальная сила, а, следовательно, давление на его выходе будет минимальное. Это давление поступает в камеры А<sub>5</sub> и Б<sub>6</sub> элементов сравнения 5 и 6. Давление, устанавливаемое задатчиком 7, соответствует минимальному весу измерительного элемента, а давление, устанавливаемое задатчиком 8, максимальному весу. Поступающее в соответствующие камеры элементов сравнения давление с выхода преобразователя 4 в начальный момент меньше давлений, устанавливаемых задатчиками 7 и 8. Поэтому на выходе элемента 5 будет сигнал единичного уровня, а на выходе элемента 6 – нулевого. При таких входных сигналах триггер 9 будет иметь на своем выходе нулевой сигнал, под действием которого трехходовой клапан 10 займет такое положение, при котором линия вакуума соединяется с полостью измерительного элемента. При этом начинается процесс заполнения контролируемой жидкостью измерительного сосуда 1 через капиллярную трубку 2. При заполнении сосуда 1 будет увеличиваться сила, действующая на чувствительный элемент преобразователя 4, а, следовательно, и давление на его выходе. Как только давление на выходе преобразователя 4 станет больше, чем давление в камере А элемента 6, на выходе элемента сравнения 6 появится единичный сигнал, переводящий триггер 9 в состояние с единичным выходным сигналом. Этим сигналом, путем воздействия на исполнительный механизм трехходового клапана 10, в сосуд 1 подается избыточное давление  $P_{изб}$ . Длительность  $t$  выходного единичного импульса пропорциональна кинематической вязкости  $\nu_{ж}$  контролируемой жидкости и определяется, если гидростатическое давление  $P_{г} \ll P_{изб}$ , уравнением вида

$$t = \frac{128k(P_8 - P_7)l_k}{\pi d_k^4 P_{изб}} \nu_{ж},$$

где  $k$  – коэффициент передачи преобразователя 4;  $P_7, P_8$  – давление, устанавливаемое соответственно задатчиками 7 и 8.

По мере вытеснения жидкости из сосуда 1 растет выталкивающая сила  $F_{в}$ . На выходе преобразователя 4 давление уменьшается до тех пор, пока его значение не станет меньше давления, устанавливаемого задатчиком 7. При этом на выходе элемента сравнения 5 появится сигнал единичного уровня. Под действием этого сигнала триггер 9 занимает такое положение, при котором на его выходе будет нулевой сигнал. При поступлении на вход исполнительного механизма трехходового клапана 10 сигнала нулевого уровня, полость измерительного сосуда сообщается с линией вакуума. Вновь повторяется процесс заполнения измерительного элемента контролируемой жидкостью.

Информация о вязкости представляется в виде последовательности треугольных импульсов, огибающая высот которых показывает изменение вязкости.

В рассмотренном устройстве для измерения вязкости, наряду с автоматическим измерением времени истечения контролируемой жидкости из измерительного элемента, осуществляется автоматическое дозирование. Доза контролируемой жидкости определяется величиной зоны нечувствительности схемы управления. Существенным здесь является и то, что показания устройства не зависят от количества жидкости, остающейся на стенках измерительного сосуда, так как измерения ведутся только по количеству вытекшей жидкости.

Использование в конструкции вискозиметра пневматических элементов УСЭППА [23], серийно выпускаемых промышленностью, легкая совместимость его с существующим технологическим оборудованием, простота монтажа и демонтажа, полная пожаро- и взрывобезопасность – все это существенно отличает описанное устройство от известных.

Приведенная погрешность прибора не превышает 2,5 %, что является достаточным для производственного контроля вязкости непосредственно в реакционном аппарате. Диапазон измерения может быть существенно расширен путем изменения размеров капилляра и величины продавливающего давления.

#### 2.4.2. Пневматическое импульсное устройство для измерения вязкости с непрерывным выходным сигналом

В рассмотренном выше устройстве для измерения вязкости мерой контролируемого параметра является время  $\tau_{и}$  истечения заданного объема жидкости через капилляр. Значение времени истечения определяется по изменению выталкивающей силы, действующей на измерительный элемент, на заданную величину.

В некоторых случаях целесообразно представление выходного сигнала измерительного устройства в аналоговой форме при реализации им импульсного метода измерения. Время истечения  $\tau_{и}$  в этом случае является постоянной величиной.

На рис. 2.7 представлена принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости, реализующего импульсный метод измерения с формированием непрерывного пневматического выходного сигнала [58, 59].

Устройство для измерения вязкости состоит из измерительного элемента, содержащего измерительный сосуд 1 с капилляром 2, соединенный газоподводящей трубкой 3 с преобразователем 4 силы в давление сжатого воздуха. Выход преобразователя 4 подает в камеру В элемента сравнения 5. С камерой Б элемента сравнения 5 соединен задатчик давления 6. Выход элемента сравнения поступает к одному из входов триггера 7 с отдельными входами. Выходной сигнал триггера 7 подан в камеру А управления пневматического клапана 8 и на исполнительный механизм трехходового клапана 9. К одному из входов клапана 9 подключена линия 10 постоянного избыточного давления, к другому входу 11 – линия вакуума. Сопло пневматического клапана 8 соединено с камерой Б трехмембранного пневматического реле 12, в отрицательной обратной связи которого установлено инерционное звено (дроссель 13, пневматическая емкость 14). Выход пневматического реле 12 подан в камеру Б второго пневматического реле 15 и в камеру В элемента памяти 16. В камеру Б клапана 8, в камеры В реле 12 и 15, в камеру Б элемента памяти 16 поступает давление подпора. Выход реле 15 соединен с другим входом триггера 7. Вход элемента памяти 16 подключен к выходу преобразователя силы 4 камерами А и Г. Выход элемента памяти 16 соединен с входом вторичного прибора 17. Измерительный элемент заключен в защитный кожух 18 и погружен в контролируемую жидкость, находящуюся в контролируемом аппарате.

Пусть в начальный момент времени жидкость в полости измерительного сосуда 1 отсутствует. На вход преобразователя 4 при этом воздействует минимальная сила, поэтому на его выходе будет минимальное давление. Это давление поступает в камеру В элемента сравнения 5. Давление, устанавливаемое задатчиком 6, соответствует максимальному весу

измерительного элемента с газоподводящей трубкой. В начальный момент време-

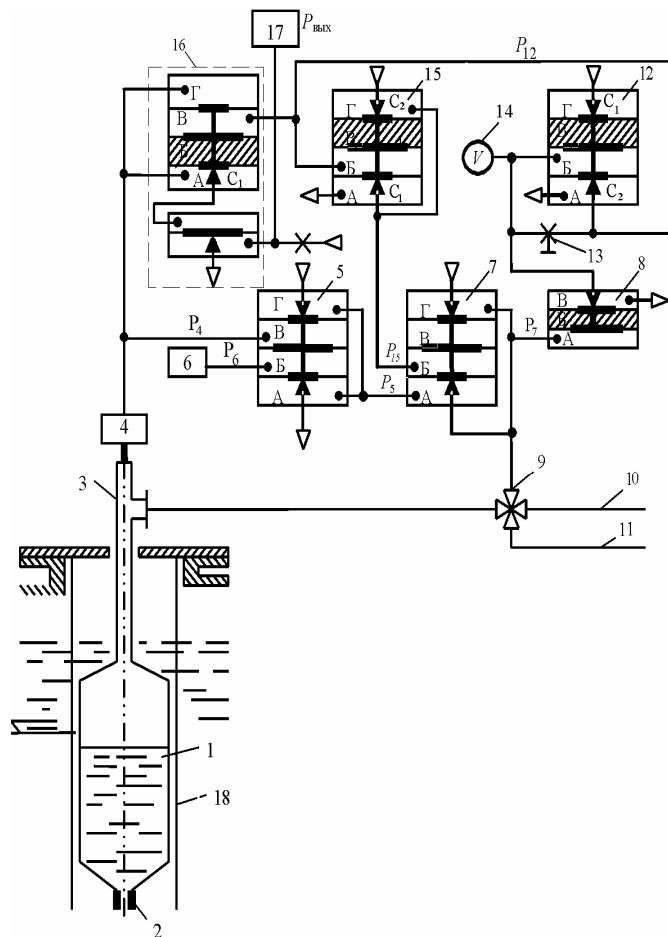


Рис. 2.7. Принципиальная пневматическая схема устройства для измерения жидкости с постоянным выходным сигналом

ни давление  $P_4$ , поступающее с выхода преобразователя 4, меньше давления  $P_6$ , устанавливаемого задатчиком 6. Поэтому на выходе элемента сравнения 5 будет сигнал нулевого уровня, т.е.  $P_5 = 0$ . При таком входном сигнале триггер с отдельными входами 7 принимает такое состояние, при котором его выходное давление  $P_7 = 0$ . Клапан 9 при поступлении на его вход давления  $P_7 = 0$  соединяет линию вакуума 11 через газоподводящую трубку 3 с полостью измерительного элемента.

Контролируемая жидкость при создании разрежения в полости измерительного элемента начинает натекает в измерительный сосуд 1 через капилляр 2.

Давление  $P_7 = 0$  не изменяет состояния клапана 8, при котором камера Б пневмореле 12 через открытое сопло клапана соединяется с атмосферой. При этом на выходе реле 12 будет давление  $P_{12} = 1$ . Этим давлением прикрывается сопло  $C_1$  элемента памяти 16 и сопло питания  $C_2$  пневмореле 15. Через сопло  $C_1$  реле 15 камера Б триггера 7 соединена с атмосферой, т.е.  $P_{15} = 0$ . С выхода элемента памяти 16 на вторичный прибор 17 поступает начальное давление  $P_{\text{вых}} = P_4 = 0,02$  МПа.

Заполнение измерительного элемента контролируемой жидкостью происходит до тех пор, пока давление  $P_4$  на выходе преобразователя 4 не станет равно давлению задания  $P_6$ . При таком значении давления  $P_4$  на выходе элемента сравнения 5 будет сигнал  $P_5 = 1$ . Этим давлением триггер 7 переводится в состояние с единичным выходом  $P_7 = 1$ , которым клапан 9 подключает линию сжатого воздуха 10 к полости измерительного элемента. Начинается процесс вытеснения жидкости из измерительного элемента. При этом давлением  $P_7 = 1$  прикрывается сопло клапана 8 и в пневматической емкости 14 инерционного звена начинает расти давление до значения, определяемого уровнем срабатывания реле 12.

При срабатывании реле 12 давление на его выходе  $P_{12} = 0$ . Этим давлением производится сброс памяти элемента 16 и срабатывание реле 15. При этом с выхода реле 15 единичное давление поступает в камеру Б триггера 7, на выходе которого давление становится равным нулю. Через сопло клапана 8 камера Б реле 12 соединяется с атмосферой. На выходе реле 12 вновь появляется давление  $P_{12} = 1$ , которым производится запоминание давления  $P_{\text{вых}}$ , определяющего количество жидкости, вытекшей из измерительного элемента в течение некоторого постоянного времени.

При поступлении сигнала на входе исполнительного механизма трехходового клапана  $P_7 = 0$  в полость измерительного элемента вновь подается разрежение, которым осуществляется заполнение измерительного элемента контролируемой жидкостью.

В дальнейшем работа измерительного устройства происходит аналогично рассмотренному выше.

Время истечения жидкости из измерительного элемента может быть изменено путем изменения проводимости дросселя 13.

В рассмотренной конструкции вискозиметра время измерения является постоянной величиной, что позволяет проводить контроль жидкости в большом диапазоне вязкостей при постоянном перепаде давления на капилляре.

Представление выходного сигнала устройства в аналоговой форме позволит применить пневматические вторичные приборы, серийно выпускаемые нашей промышленностью.

## 2.5. КОМПЕНСАЦИЯ И КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ВЕЛИЧИН НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.5.1. Устройство для автоматического контроля вязкости жидких веществ с компенсацией влияния гидростатического давления и давления в аппарате

Давление  $P_{ан}$  над поверхностью контролируемой жидкости и уровень жидкости  $h$  внутри реакционного аппарата, как правило, подвержены изменениям. Для исключения влияния этих изменений на результат измерений вязкости необходимо, чтобы истечение жидкости происходило под действием постоянного перепада давлений на капилляре.

Пневматическое устройство для измерения вязкости жидкости

(рис. 2.8) состоит из измерительного элемента, содержащего измерительный сосуд 1 и капилляр 2, соединенного газоподводящей трубкой 3 с преобразователем 4 силы в давление, выход которого подключен в камеру А элемента 5 сравнения и в камеру Б элемента 6 сравнения. В камеру Б элемента 5 и в камеру А элемента 6 подключены соответственно задатчики 7 и 8 давлений. Выходы элементов сравнения подключены к входам триггера 9 с отдельными входами, выход которого поступает на вход вторичного прибора (на рис. 2.8 не показан) и в камеру Б реле 10, в камеру А которого подан подпор. В сопло 11 реле 10 подключен выход пятимембранного элемента сравнения 12, соединенного по схеме повторителя.

В начальный момент жидкость в полости измерительного сосуда 1 отсутствует. На вход преобразователя 4 воздействует минимальная сила, а следовательно, на его выходе имеется минимальное давление  $P_4$ . Это давление поступает в камеру А элемента сравнения 5 и в камеру Б элемента сравнения 6. Давление  $P_7$ , устанавливаемое задатчиком 7, соответствует минимальному весу измерительного элемента, а давление  $P_8$ , устанавливаемое задатчиком 8 – максимальному весу.

Поступающие в соответствующие камеры элементов сравнения, давления с выхода преобразователя в начальный момент меньше давлений, устанавливаемых задатчиками 7 и 8, поэтому на выходе элемента 5 сравнения присутствует сигнал единичного уровня, а на выходе элемента 6 – нулевого. При таких входных сигналах триггер 9 имеет на своем выходе нулевой сигнал. Реле 10 под действием подпора занимает такое положение, при котором сопло 1 закрыто, а сопло 18 открыто. Через открытое сопло 18 и газоподводящую трубку 3 в полость измерительного элемента подается вакуум, величина которого постоянна.

Контролируемая жидкость под действием созданного перепада давления заполняет измерительный сосуд 1 через капилляр 2. По мере натекания жидкости в сосуд 1 увеличивается сила, действующая на преобразователь 4, а следовательно, и давление на его выходе. Как только давление на выходе преобразователя 4 становится больше давления в камере А элемента 6, на выходе этого элемента сравнения появляется единичный сигнал, переводящий триггер в положение, при котором на его выход поступает сигнал единичного уровня. Этот сигнал, поступая на вход реле 10, перемещает мембранный блок, закрывая сопло 18 и открывая сопло 11. В сосуд 1 поступает избыточное давление, под действием которого контролируемая жидкость вытекает из сосуда 1 через капилляр 2.

Постоянство перепада давления на капилляре поддерживается следующим образом.

При поступлении на входы пятимембранного элемента сравнения 13 давлений на его выходе будет давление

$$P_{13} = P_{16} + P_{14} - P_{17},$$

где  $P_{17}$  – давление, соответствующее заданному уровню жидкости;  $P_{14}$  – начальное давление;  $P_{16}$  – давление, поступающее с выхода.

При соответствии уровня в аппарате заданному значению, при котором  $P_{16} = P_{17}$ , на выходе элемента сравнения 15 присутствует давление

$$P_{13} = P_{14}. \quad (2.21)$$

Давление  $P_{13}$  с выхода пятимембранного элемента сравнения 13 поступает в камеру Д элемента сравнения 12. В камеру В элемента 12 подается давление  $P_{15}$  с выхода задатчика 15, соответствующее величине избыточного давления, при котором должно проходить измерение, в камеру Г этого же элемента подается давление  $P_{14}$  с выхода задатчика 14, являющееся начальным давлением или давлением смещения. Введение этого давления позволяет в зависимости от знака разности ( $P_{16} - P_{17}$ ) оказывать различное влияние на  $P_{12}$ . На выходе элемента сравнения 12, при поступлении на его входы перечисленных давлений, будет выходной сигнал

$$P_{12} = P_{13} - P_{14} + P_{15}. \quad (2.22)$$

С учетом формулы (2.21) уравнение (2.22) принимает вид

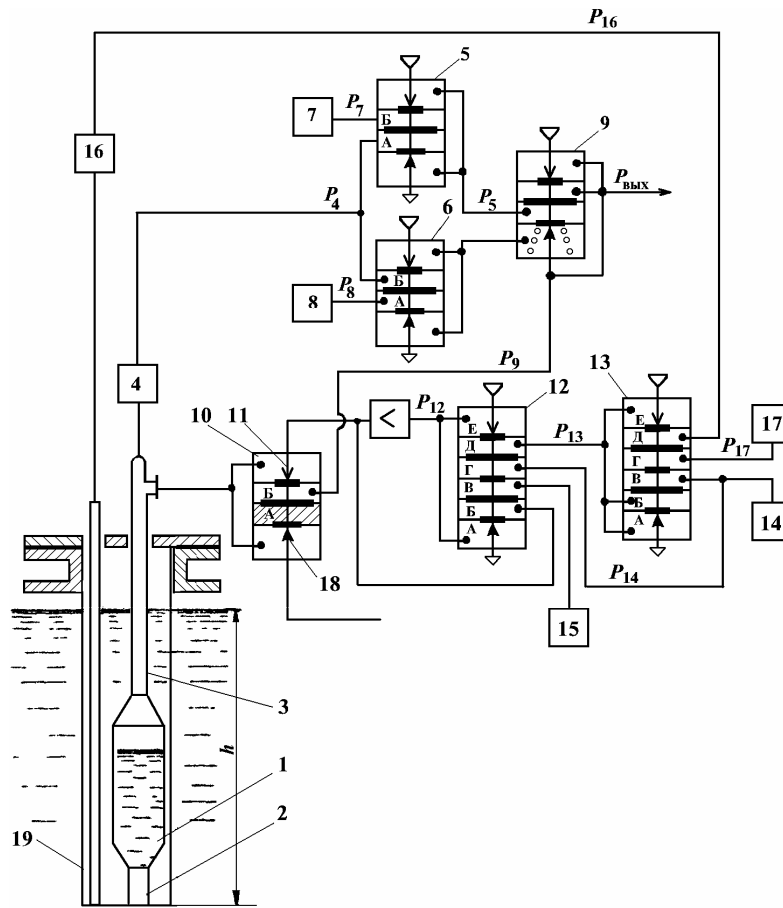
$$P_{12} = P_{15}.$$

Таким образом, в измерительный элемент по газоподводящей трубке поступает избыточное давление, величина которого соответствует заданному значению.

Пусть давление  $P_{ан}$  в аппарате над поверхностью жидкости и уровень  $h$  жидкости изменились. Тогда с выхода уровнемера на вход (в камеру Д) элемента сравнения 13 поступает давление

$$P_{16} = \rho_{ж}g(h \pm \Delta h) + (P_{ан} \pm \Delta P_{ан}), \quad (2.23)$$

где  $h$  – уровень жидкости в аппарате (заданная глубина погружения чувствительного элемента уровнемера и измерительного вискозиметра);  $\Delta h$ ,  $\Delta P_{ан}$  – изменение уровня и давления над поверхностью жидкости, соответственно.



**Рис. 2.8. Устройство для измерения вязкости жидкости с блоком компенсации влияния неконтролируемых величин**

В уравнении (2.23) величина  $\rho_{ж}gh + P_{ан} = P_{17}$ , поэтому

$$P_{16} = P_{17} \pm (\rho_{ж}g\Delta h + \Delta P_{ан}).$$

При поступлении такого давления на вход элемента 13 на его выходе будет давление

$$P_{13} = P_{14} \pm (\rho_{ж}g\Delta h + \Delta P_{ан}).$$

Это давление поступает на вход в камеру Д элемента сравнения 12, выходное давление которого, подаваемое в измерительный элемент, равно

$$P_{12} = P_{15} \pm (\rho_{ж}g\Delta h + \Delta P_{ан}).$$

При подаче избыточного давления в полость измерительного элемента, по мере вытеснения жидкости, растет выталкивающая сила, под действием которой уменьшается сила, поступающая на вход преобразователя 4, вследствие чего давление на его выходе уменьшается. Уменьшение давления происходит до тех пор, пока его значение не станет меньше давления, устанавливаемого датчиком 7. При этом на выходе элемента сравнения 5 появляется сигнал единичного уровня. Под действием этого сигнала триггер 9 занимает такое положение, при котором на его выходе присутствует нулевой сигнал. Мембранный блок реле 10 под действием подпора переключается вверх, соединяя при этом полость измерительного сосуда 1 с линией вакуума. Начинается процесс заполнения измерительного элемента жидкостью.

С выхода триггера 9 в процессе измерения поступает на вторичный прибор импульсы прямоугольной формы, длительность которых зависит от вязкости и определяется из уравнения Пуазейля в виде

$$t = \frac{128 \cdot \Delta F_{в} \eta_{ж} l_{к}}{\pi d_{к}^4 \Delta P_{к} (\rho_{ж} - \rho_{г})},$$

где  $\Delta F_{в}$  – изменение выталкивающей силы, действующей на полностью погруженный измерительный элемент при вытеснении из него избыточным давлением  $P_{12}$  контролируемой жидкости через капилляр;  $\Delta P_{к}$  – перепад давления на капилляре.

Величины  $\Delta F_{в}$ ,  $l$ ,  $d$ ,  $\Delta P_{к}$ ,  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{г}$  являются постоянными, поэтому

$t = C \eta_{ж}$ , где  $C$  – постоянная величина. В рассматриваемом устройстве производится одновременно преобразование времени истечения жидкости из измерительного элемента и автоматическое дозирование жидкости, потому что объем жидкости, поступающей в измерительный сосуд и вытекающей из него, определяется давлениями, устанавливаемыми при помощи датчиков 7 и 8.

В случае, если контролируемая жидкость взаимодействует с воздухом, в измерительный элемент через сопло питания элемента 12 сравнения необходимо подавать инертный газ, например азот.

Использование описанного выше устройства в промышленности позволяет упростить процесс измерения вязкости жидких продуктов, обладающих повышенной пожаро- и взрывоопасностью, так как оно выполнено на пневматических элементах.

Получение выходного сигнала в импульсной форме позволяет передавать результаты измерения без потери информации на расстояния, значительно превышающие допустимые для пневматических сигналов, представленных в аналоговой форме.

При необходимости измерения скорости истечения дозы контролируемой жидкости, рассмотренное устройство может быть снабжено регистратором, подключенным к выходу преобразователя силы в давление сжатого воздуха. При этом показания устройства не зависят от количества жидкости, остающейся на стенках измерительного сосуда по той причине, что измерения ведут только по количеству вытекающей жидкости путем фиксации изменения веса измерительного сосуда, которое происходит под действием выталкивающей силы.

Точность устройства для измерения вязкости жидкостей при работе его в производственном аппарате выше, по сравнению с известными устройствами вследствие того, что истечение жидкости происходит под действием постоянного перепада давления независимо от изменения уровня жидкости в аппарате и избыточного давления над поверхностью жидкости.

### 2.5.2. Устройство для автоматического контроля вязкости жидких веществ с компенсацией гидростатического давления в измерительном элементе

Контроль вязкости в производственных условиях невозможен без выполнения вспомогательных операций, таких как пробоотбор и пробоподготовка. При прочих равных условиях необходимо отдавать предпочтение измерительным устройствам с погружным измерительным элементом, так как они не имеют вспомогательных устройств подготовки пробы к анализу.

Применение капиллярного метода контроля вязкости жидких веществ внутри технологических аппаратов сопряжено с необходимостью решения таких задач как измерение времени истечения дозы жидкости и учет влияния ряда неконтролируемых величин на выходной сигнал. Наиболее простое решение возможно при использовании гидростатического взвешивания [57 – 61].

В известных автоматических устройствах для контроля вязкости [58, 60] на выходной сигнал оказывают влияние систематические погрешности, возникающие вследствие изменения давления  $P_a$  в аппарате, глубины погружения измерительного элемента  $H$ , уровня жидкости  $h$  в измерительном сосуде. Одним из путей уменьшения влияния указанных систематических погрешностей является применение метода вспомогательных измерений [86], заключающегося в автоматизации учета дополнительных погрешностей по известным функциям ряда неконтролируемых величин. Для этого осуществляется измерение этих величин и с помощью специального вычислительного устройства автоматически корректируется выходной сигнал средства контроля.

Рассмотрим устройство (рис. 2.9) и принцип действия капиллярного погружного автоматического вискозиметра, точность которого повышена за счет коррекции статической характеристики пневматическими средствами автоматики.

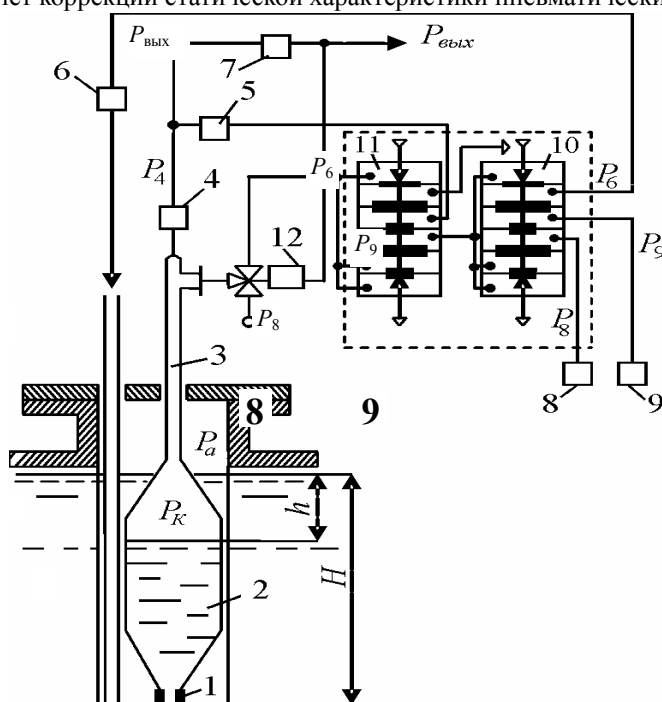


Рис. 2.9. Устройство для автоматического измерения вязкости жидких веществ с компенсацией гидростатического давления в измерительном элементе

Пусть в начальный момент времени жидкость в полости измерительного сосуда 2, снабженного капиллярной трубкой 1 истечения, отсутствует. На вход преобразователя 4 силы в давление сжатого воздуха посредством газоподводящей трубки 3 воздействует минимальная сила

$$F_1 = F_g - F_{в1},$$



где  $F_g$  – сила тяжести, действующая со стороны измерительного элемента на чувствительный элемент преобразователя 4;  $F_{в1}$  – выталкивающая сила, действующая на измерительный элемент при отсутствии в нем жидкости.

С выхода преобразователя 4 давление  $P_4$  поступает на вход блока умножения 5 и на вход позиционного регулятора 7 с независимой настройкой пределов срабатывания. Верхний и нижний пределы срабатывания регулятора 7 соответствуют максимальной и минимальной массам измерительного элемента. Поступающее в начальный момент давление  $P_4$  с выхода преобразователя 4 не вызывает изменения выходного сигнала регулятора, значение которого при этом  $P_{вых} = 0$ . Под действием такого давления, поступающего на исполнительный механизм трехходового клапана 12, в полость измерительного сосуда 2 по газоподводящей трубке 3 подается вакуум  $P_B$  или атмосферное давление.

Контролируемая жидкость под действием созданного перепада давлений заполняет измерительный сосуд 2 через капиллярную трубку истечения 1 с диаметром  $d_k$  и длиной  $l_k$ . Процессы, происходящие в пневмогидравлическом измерительном элементе, описываются системой линейных дифференциальных уравнений (2.24) с коэффициентами, значения которых приведены в табл. 2.3.

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = Ah + B_1 P_k + C_1, \\ P_k \frac{dh}{dt} + h \frac{dP_k}{dt} = B_2 P_k + C_2. \end{cases} \quad (2.24)$$

Процесс заполнения (пробоотбор) в измерительном элементе погружного типа описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = \frac{\alpha_1 g}{S} h + \frac{\alpha_1}{\rho_j S} P_k + \frac{\alpha_1}{\rho_j S} (\rho_j g H + P_a), \\ P_k \frac{dh}{dt} + h \frac{dP_k}{dt} = -\frac{\alpha_{13} RT}{S} P_k + \frac{\alpha_{13} RT}{S} P_B, \end{cases} \quad (2.25)$$

где  $S$  – площадь сечения измерительного сосуда;  $P_a$  – давление над поверхностью жидкости;  $\alpha_3$  – проводимость газоподводящей трубки 3;  $\alpha_1$  – проводимость капиллярной трубки истечения без учета краевых эффектов.

При  $\alpha_3 \rightarrow \infty$  из второго уравнения системы (2.25)  $P_k = P_B$ , с учетом чего первое уравнение примет вид:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{d_1 g}{S} h = \frac{\alpha_1}{\rho_j S} P_B + \frac{\alpha_1}{\rho_j S} (\rho_j g H + P_a). \quad (2.26)$$

Решение уравнения (2.26) относительно времени  $\tau_3$  заполнения измерительного сосуда контролируемой жидкостью с изменением уровня от  $h_1$  до  $h_2$

$$\tau_3 = \frac{S}{\alpha_1 g} \ln \left[ \frac{P_B + (\rho_j g H + P_a) - \rho_j g h_1}{P_B + (\rho_j g H + P_a) - \rho_j g h_2} \right]. \quad (2.27)$$

Учитывая, что  $\rho_j \gg \rho_r$ ,  $S[P_B + (\rho_j g H + P_a)] = K$

$$h_1 = \frac{F_{в1}}{Sg\rho_j}, \quad h_2 = \frac{F_{в2}}{Sg\rho_j}, \quad (2.28)$$

где  $F_{в1}$  и  $F_{в2}$  – выталкивающие силы, действующие на измерительный сосуд при уровне  $h_1$  и  $h_2$  в нем, соответственно, запишем (2.28) в виде

**2.3. Коэффициенты системы дифференциальных уравнений (2.24),  
описывающей ПП при выполнении им различных функций  
при  $P_1 = \text{const}$**

Схема ПП	Функция, выполняемая ПП	Значения коэффициентов
	Отбор пробы контролируемой жидкости	$A = -\frac{\alpha_1 g}{S};$ $B_1 = \frac{\alpha_1}{\rho_{ж} g};$ $C_1 = \frac{\alpha_1 (\rho_{ж} g H + P_a)}{\rho_{ж} g};$ $B_2 = \frac{\alpha_{13} R T}{S};$ $C_2 = \frac{\alpha_{13} R T + P_b}{S}$
	Вытеснение жидкости поступающим газом (измерение)	$A = -\frac{d_1 g}{S};$ $B_1 = \frac{\alpha_1}{\rho_{ж} S};$ $C_1 = -\frac{\alpha_1 (\rho_{ж} g H + P_a)}{\rho_{ж} g};$ $B_2 = -\frac{\alpha_{13} R T}{S};$ $C_2 = \frac{\alpha_{13} R T P_{11}}{S}$

Пр и м е ч а н и е. А, В<sub>1</sub>, С<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, С<sub>2</sub> – коэффициенты; P<sub>к</sub> – давление в полости измерительного сосуда 2.

$$\tau_3 = \frac{S}{\alpha_2 g} \ln \left[ \frac{K - F_{в1}}{K - F_{в2}} \right]. \quad (2.29)$$

По мере натекания контролируемой жидкости в измерительный сосуд 2 уменьшается сила  $F_{в}$ , действующая на чувствительный элемент преобразователя 4, давление  $P_4$  при этом увеличивается. Как только  $P_4$  достигает верхнего предела срабатывания регулятора 7, на его выходе сформируется сигнал единичного уровня, т.е.  $P_{\text{вых}} = 1$ . Под действием давления  $P_{\text{вых}} = 1$  трехходовой клапан займет положение, при котором в измерительный сосуд 14 поступает избыточное давление  $P_{11}$  с выхода пятимембранного сумматора 11. Давлением  $P_{11}$  контролируемая жидкость вытесняется из измерительного сосуда по капиллярной трубке истечения. Процесс истечения, а, следовательно, измерения, описывается системой дифференциальных уравнений (2.24) с соответствующими коэффициентами из таблицы в виде

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -\frac{\alpha_1 g}{S} h + \frac{\alpha_1}{\rho_{ж} S} P_k - \frac{\alpha_2}{\rho_{ж} S} (\rho_{ж} g H + P_a), \\ P_k \frac{dh}{dt} + h \frac{dP_k}{dt} = -\frac{\alpha_{13} R T}{S} (P_{11} - P_k). \end{cases} \quad (2.30)$$

При  $\alpha_3 \rightarrow \infty$   $P_{11} = P_k$ . Из первого уравнения системы (2.30) получим выражение для определения времени  $\tau_{и}$  истечения заданного объема жидкости  $V = S(h_2 - h_1)$

$$\tau_{и} = \frac{S}{\alpha_1 g} \ln \left[ \frac{(P_k - P_a) + \rho_{ж} g H - \rho_{ж} g h_1}{(P_k - P_a) + \rho_{ж} g H - \rho_{ж} g h_2} \right]. \quad (2.31)$$

После подстановки в (2.31) значений  $h_1, h_2$  из (2.28) получим

$$\tau_{и} = \frac{S}{\alpha_1 g} \ln \left[ \frac{K_1 - F_{в1}}{K_1 - F_{в2}} \right], \quad (2.32)$$

где  $K_1 = S [(P_k - P_a) + \rho_{ж} g H]$ .

В капиллярных вискозиметрах при проведении измерений режим течения жидкости должен быть ламинарным, при котором критерий Рейнольдса  $Re < 1400$ . Проводимость  $\alpha_1$  при таком режиме

$$\alpha_1 = \frac{\pi d_k^4 \rho_{ж}}{128 \eta_{ж} l_k}, \quad (2.33)$$

или с учетом краевых эффектов

$$\alpha'_1 = \alpha_1 \left( 1 + \frac{d_k}{32l_k} \text{Re} \right). \quad (2.34)$$

Так как

$$\text{Re} = \frac{4V}{\pi \tau_{и} d_k v_{ж}}, \quad (2.35)$$

то после подстановки в (2.32) вместо  $\alpha_1$  значения  $\alpha'_1$  из (2.34) с учетом (2.35) получим

$$\tau_{и} = \frac{128Sl_k \eta_{ж}}{\pi d_k^4 g \rho_{ж}} \ln \left[ \frac{K - F_{в1}}{K - F_{в2}} \right] - \frac{\Delta F_{в}}{8\pi l_k g \eta_{ж}}, \quad (2.36)$$

где  $\Delta F_{в} = F_{в2} - F_{в1}$ .

При истечении жидкости под действием постоянного перепада давления  $\Delta P_{\text{кап}}$  время  $\tau_{и}$  истечения заданного количества анализируемого вещества с учетом краевых эффектов определяется уравнением

$$\tau_{и} = \Delta F_{в} \frac{128l_k}{\pi d_k^4 \Delta P_{\text{кап}} g} \frac{\eta_{ж}}{\rho_{ж}} - \Delta F_{в} \frac{1}{8\pi l_k g \eta_{ж}}. \quad (2.37)$$

В (2.36) учтено влияние  $P_2$ ,  $h$  и  $H$  на время истечения  $\tau_{и}$ . Оценка систематической погрешности от влияющих величин на перепад давления может быть осуществлена с использованием уравнения

$$\sigma \Delta P_{\text{кап}} = \sqrt{\left( \frac{\sigma \Delta P_{\text{к}}}{\sigma H} \Delta H \right)^2 + \left( \frac{\sigma \Delta P_{\text{к}}}{\sigma h} \Delta h \right)^2 + \left( \frac{\sigma \Delta P_{\text{к}}}{\sigma P_{\text{а}}} \Delta P_{\text{а}} \right)^2},$$

где  $\Delta H$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta P_{\text{а}}$  – предельные абсолютные погрешности.

Относительная погрешность

$$\delta = \frac{\sigma \Delta P_{\text{кап}}}{\Delta P_{\text{кап.ном}}} 100 \text{ \%}.$$

Отклонение влияющих величин от номинальных значений на  $\Delta H = 0,1 \text{ м}$ ;  $\Delta h = 0,1 \text{ м}$ ;  $\Delta P_{\text{а}} = 0,1 \cdot 10^4 \text{ Па}$ ;  $\Delta P_{\text{кап.ном}} = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$  приводит к изменению перепада давления на капиллярной трубке истечения, определяемому относительной погрешностью 7 %.

В разработанной конструкции устройства для автоматического контроля вязкости коррекция результата измерения осуществляется непрерывно посредством соответствующего управления величиной избыточного давления  $P_{11}$ , подаваемого в полость измерительного сосуда для продавливания контролируемой жидкости. Целью такого управления является поддержание постоянным перепада давления на капиллярной трубке истечения.

При поступлении на входы пятимембранного элемента сравнения 10 давлений  $P_6$ ,  $P_8$  и  $P_9$  с выходов уровнемера 6 и датчиков 8 и 9, соответственно, давление на его выходе

$$P_{10} = P_6 - P_8 + P_9. \quad (2.38)$$

На входы элемента сравнения 11 поступают давление  $P_5$  с выхода блока умножения 5 и давление  $P_{10}$ . С выхода элемента сравнения 11 в измерительный сосуд 2 через трехходовой клапан 12 поступит давление

$$P_{\text{к}} = P_{11} = P_{10} - P_5. \quad (2.39)$$

Уравнение (2.39) с учетом (2.38) примет вид

$$P_{11} = -P_5 + P_6 - P_8 + P_9. \quad (2.40)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} P_5 &= \rho_{ж} g h, \\ P_8 &= \rho_{ж} g H_{\text{зад}}, \\ P_6 &= \rho_{ж} g H + P_{\text{а}}, \\ P_9 &= P_{\text{к зад}}, \end{aligned} \quad (2.41)$$

где  $P_{\text{к зад}}$ ,  $H_{\text{зад}}$  – заданные давления в измерительном сосуде и глубина погружения измерительного элемента, при которых происходит истечение, из уравнения (2.40) получим

$$P_{\text{к}} = -\rho_{ж} g h + \rho_{ж} g H + P_{\text{а}} - \rho_{ж} g H_{\text{зад}} + P_{\text{к зад}}. \quad (2.42)$$

Давление  $P_{11}$  поступает в измерительный сосуд 2, из которого под действием перепада давления  $\Delta P_{\text{кап}}$  вытекает контролируемая жидкость, причем

$$\Delta P_{\text{кап}} = P_{\text{к}} - \rho_{ж} g H - P_{\text{а}} + \rho_{ж} g h. \quad (2.43)$$

Подставляя (2.42) в (2.43) после преобразования получим

$$\Delta P_{\text{кап}} = P_{\text{к зад}} - \rho_{ж} g H_{\text{зад}} = P_9 - P_8. \quad (2.44)$$

Таким образом, истечение жидкости из измерительного сосуда 2 по капилляру 1 происходит под действием постоянного перепада давления  $\Delta P_{\text{кап}}$ , величина которого может быть изменена датчиками 8 и 9.

Контролируемая жидкость вытекает из измерительного сосуда 2 до тех пор, пока давление на выходе преобразователя 4 не достигнет нижнего предела срабатывания регулятора. При этом на выходе регулятора появится сигнал  $P_{\text{вых}} = 0$ , воздействием которого на исполнительный механизм трехходового клапана 12 полость измерительного сосуда 2 соединяется с атмосферой или линией вакуума. Контролируемая жидкость вновь заполняет измерительный сосуд. В дальнейшем процесс происходит аналогично изложенному выше.

Критерием применимости разработанного устройства для производственного контроля является соотношение

$$\sum_{i=1}^n \delta_{\text{инст}i} < \sum_{j=1}^k \delta_{\text{сист}j},$$

где  $\delta_{\text{инст}i}$  – инструментальные погрешности, возникающие вследствие введения корректирующих воздействий;  $\delta_{\text{сист}j}$  – систематические погрешности, коррекция которых предусмотрена в устройстве.

Использование гидростатического взвешивания измерительного элемента позволяет осуществлять не только пробоотбор и изменение вязкости анализируемого вещества, но и получить информацию о текущем изменении уровня  $h$  в емкости измерительного сосуда, что дает возможность:

- в процессе измерения непрерывно определять скорость истечения;
- осуществлять корректирующее воздействие на продавливающее давление, учитывающее изменение перепада давления на капиллярной трубке истечения при изменении уровня в емкости измерительного элемента.

### 2.5.3. Устройство для автоматической коррекции выходных временнупульсных сигналов при температурных изменениях вязкости

Показания вискозиметров любого типа существенно зависят от изменения температуры анализируемой жидкости. Для устранения температурной погрешности в разработанных вискозиметрах с времяимпульсным выходным сигналом необходимо использовать специальный блок температурной коррекции (БТК) выходного сигнала измерительного устройства, схема которого представлена на рис. 2.10. Корректирующим блоком, подключенным к выходу любого из устройств для контроля вязкости с импульсным выходным сигналом, в зависимости от величины и знака отклонения температуры жидкости  $T$  от номинального значения  $T_n$  осуществляется изменение длительности выходного импульса устройства.

Рассмотрим принцип действия корректирующего блока в случае повышения температуры жидкости, когда  $T > T_n$ .

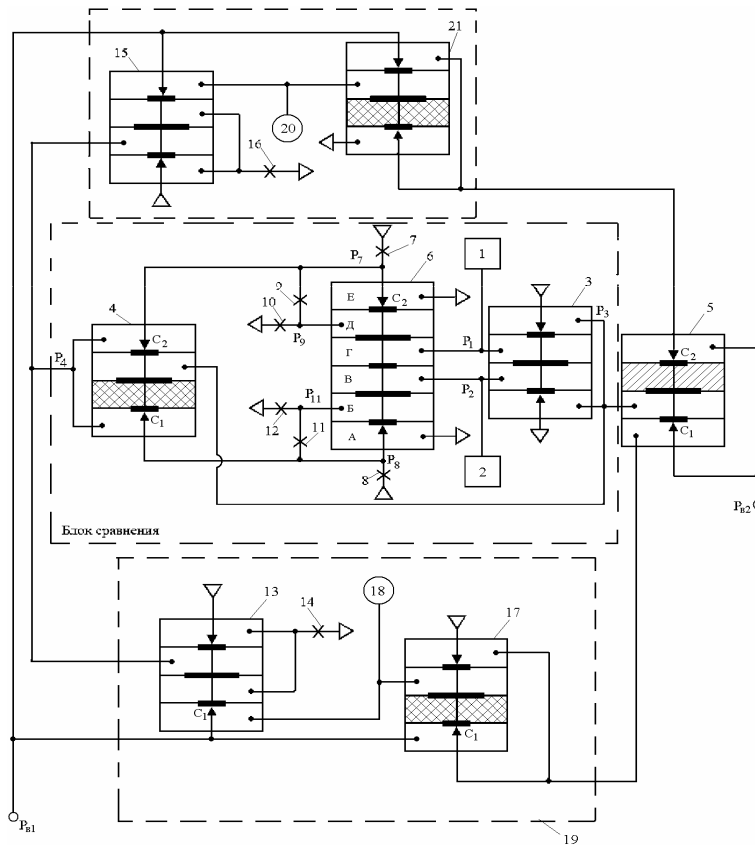
Давление  $P_1$  на выходе измерителя температуры 1 пропорционально температуре жидкости, т.е.  $P_1 = aT$ , где  $a = \text{const}$ . Задатчиком 2 устанавливается давление  $P_2$ , пропорциональное номинальной температуре  $P_2 = aT_n$ . В случае, если  $T_n < T$ ,  $P_2 < P_1$ , на выходе элемента сравнения 3 формируется сигнал  $P_3 = 1$ . Под действием давления  $P_3 = 1$  сопло  $C_2$  реле 4 и сопло  $C_1$  реле 5 открываются. Мембранный блок пятимембранного элемента сравнения 6 перемещается вверх. Давление  $P_7$  в камере, образованной постоянным дросселем 7 и соплом  $C_2$  элемента 6, начнет увеличиваться. Давление  $P_7$  через дроссельный делитель (дроссели 9 и 10) поступает в камеру  $D_6$  отрицательной обратной связи.

Учитывая условие равновесия мембранного блока элемента 6 давление  $P_7$  можно найти из уравнения

$$P_7 = \frac{\alpha_9 + \alpha_{10}}{\alpha_9} a(T - T_n), \quad (2.45)$$

где  $\alpha_9$  и  $\alpha_{10}$  – проводимости дросселей 9 и 10.

Давление  $P_4 = P_7$ , так как сопло  $C_2$  реле 4 открыто. Проводимость управляемых сопротивлений  $УС_1$  и  $УС_2$ , выполненных на элементах 13, 14 и 15, 16, соответственно, изменяется давлением  $P_4$ . Рост давления  $P_4$  приводит к перемещению мембранного блока элемента сравнения 13. Проводимость  $\beta$  сопла  $C_1$  элемента 13 уменьшается и в заданном диапазоне управляющего сигнала



**Рис. 2.10.** Принципиальная пневматическая схема автоматического блока температурной коррекции

$$\beta = b/P_4, \quad (2.46)$$

где  $b = \text{const}$ .

Сигнал  $P_{в1}$  с выхода устройства для измерения вязкости через открытое сопло  $C_1$  реле 17 и сопло  $C_1$  реле 5 проходит на вход вторичного прибора. Одновременно этим давлением через сопло  $C_1$  элемента 13 заполняется пневматическая емкость 18. В течение времени действия сигнала  $P_{в1}$  давление в пневматической емкости возрастает до давления питания. Мембранный блок реле 17 опустится и на выход первого управляемого импульсатора 19 пройдет давление питания. Когда давление питания  $P_{в1}$  станет равно нулю, давление  $P_{в2}$  остается равным единице еще в течение некоторого времени. Пневматическая емкость 18 разряжается через сопло  $C_1$  реле 13 на нулевой уровень сигнала  $P_{в1}$ , при этом изменение давления  $P_{18}$  в емкости 18 определяется из уравнения

$$P_{18} = P_{пит} \exp\left[-\frac{\beta RT_0}{V_{18}} t\right],$$

где  $T_0$  – температура газа в емкости 18;  $V_{18}$  – объем емкости 18.

Время задержки  $t_3$  заднего фронта импульса  $P_{в1} = 1$  найдем из уравнения

$$P_{с17} = P_{пит} \exp\left[-\frac{\beta RT_0}{V_{18}} t_3\right],$$

где  $P_{с17}$  – давление срабатывания пневматического реле 17, в виде

$$t_3 = \frac{V_{18}}{\beta RT_0} \ln \frac{P_{пит}}{P_{с17}}. \quad (2.47)$$

Чтобы первый управляемый импульсатор сдвигал задний фронт импульса  $P_{в1} = 1$  на заданный интервал времени, необходимо выполнение следующего условия

$$\Delta t = t_3. \quad (2.48)$$

Изменение времени истечения контролируемой жидкости вследствие изменения температуры

$$\Delta t = t_n \frac{B}{T_n^2} (T - T_n), \quad (2.49)$$

где  $t_n$  – длительность выходного импульса  $P_{в1} = 1$  при номинальной температуре жидкости  $T_n$ ;  $B$  – постоянный коэффициент уравнения Гузмана-Андрате.

Из уравнений (2.45) и (2.49) получим

$$t_n \frac{B}{T_n^2} = \frac{V_{18}}{RT_0} \frac{a}{b} \left[ \frac{(\alpha_9 + \alpha_{10})}{\alpha_9} \right] \ln \left[ \frac{P_{пит}}{P_{с17}} \right]. \quad (2.50)$$

Изменяя  $V_{18}$ ,  $P_{с17}$ ,  $\alpha_9$ ,  $\alpha_{10}$  можно выполнить равенство (2.50), а следовательно и (2.48).

Таким образом, при возрастании температуры исследуемой жидкости на  $\Delta T$  длительность выходного импульса увеличивается на  $\Delta t$  при помощи БТК, т.е. компенсируется температурная погрешность.

Применяя аналогичный подход к анализу работы БТК при  $T < T_n$  получим равенство

$$t_n \frac{B}{T_n^2} = \frac{V_{20}}{RT_0} \frac{a}{b} \left[ \frac{(\alpha_{11} + \alpha_{12})}{\alpha_{11}} \right] \ln \left[ \frac{P_{пит}}{P_{пит} - P_{с21}} \right], \quad (2.51)$$

где  $V_{20}$  – объем емкости 20;  $P_{с21}$  – давление срабатывания реле 21;  $\alpha_{11}, \alpha_{12}$  – проводимости дросселей 11 и 12, соответственно.

Выполнение равенства (2.51) можно добиться изменением  $P_{с21}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, V_{20}$ .

Применять БТК целесообразно в том случае, если погрешность измерения вязкости, обусловлена изменением температуры в устройстве без БТК,  $\delta_1$  будет больше, чем погрешность температурной коррекции, складывающейся из методической  $\delta_2$  и инструментальной  $\delta_3$  погрешностей, т.е.  $\delta_1 > \delta_2 + \delta_3$ , или

$$\eta_{жн} \left( 1 - \exp \left[ \frac{B}{T} - \frac{B}{T_n} \right] \right) > \frac{k\pi r_k^4 \Delta P}{mlk} t_n \frac{B}{2T_n^3} \left( 2 + \frac{B}{T_n} \right) (T - T_n)^2 + 0,01 \left( \sum_{i=1}^n k_i^2 \right)^{1/2} \eta_d.$$

Блок температурной коррекции автоматически определяет величину отклонения по времени и деформирует выходной импульс на необходимую величину. При повышении температуры БТК увеличивает длительность выходного импульса, при понижении температуры смещает передний фронт импульса, уменьшая тем самым его длительность.

## 2.6. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧИСТКОЙ КАПИЛЛЯРА

### 2.6.1. Устройство с чисткой капилляра после каждого измерения

Известные устройства для измерения вязкости [57, 60] имеют недостаточную надежность вследствие загрязнения капилляра (образование пленки).

На рис. 2.11 приведена принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости [85], в котором осуществляется чистка капилляра в процессе измерения.

Устройство для измерения вязкости с автоматической чисткой капилляра состоит из измерительного сосуда с капилляром 1, иглы 2, исполнительного механизма 3, импульсатора 4, который, в свою очередь, состоит из пневматического реле 3, регулируемого дросселя 5 и емкости 6, измерителя времени истечения. Измеритель времени истечения выполнен в виде преобразователя 7 силы в давление сжатого воздуха, задатчиков давления 8 и 9, элементов 10 и 11 сравнения, пневматического триггера 12 и пневматического реле 13, в сопловые камеры которого подаются сигналы разного уровня.

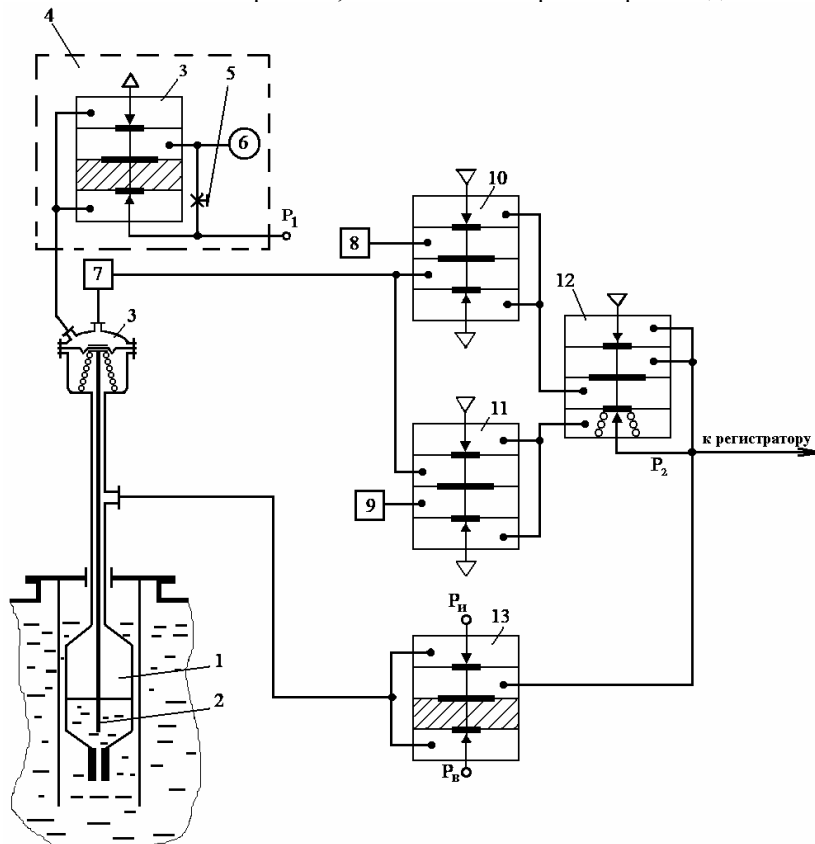


Рис. 2.11. Устройство для измерения вязкости с автоматической чисткой капилляра

В определенный момент времени по сигналу  $P_1$  от пневматического тумблера (на рис. не показан) через импульсатор 4 сигнал идет на исполнительный механизм 3, и игла 2, находящаяся в измерительном сосуде 1, опускаясь ниже уровня капилляра, разрушает пленку, образующуюся в капилляре. Жидкость заполняет измерительный сосуд 1 до определенного уровня. При этом на преобразователе 7 силы появляется сигнал, который переключает элементы

сравнения 10 и 11. Сигнал с выхода элемента 10 сравнения становится равным нулю, а единичный сигнал с элемента 11 сравнения является переключающим для пневматического триггера 12. После этого единичный сигнал с триггера 12 переключает пневматическое реле 13, через верхнюю сопловую камеру которого сигнал большего уровня проходит в измерительный

сосуд 1, и происходит его опорожнение. Выходной сигнал  $P_2$  с триггера 12 одновременно идет на вторичный прибор регистрации времени истечения измеряемой жидкости, которое пропорционально вязкости этой жидкости.

### 2.6.2. Устройство для измерения вязкости с выбором интервала между процессами чистки капилляра

В процессе эксплуатации устройства для измерения вязкости [85] чистка капилляра осуществляется посредством подачи соответствующего сигнала на вход блока управления.

Рассмотрим устройство для измерения вязкости [87], в котором разрушение пленки производится автоматически через специально подобранные рациональные интервалы времени.

На рис. 2.12 изображена схема устройства; на рис. 2.13 – принципиальная пневматическая схема блоков.

Устройство для измерения вязкости включает в себя измерительный сосуд 1 с капилляром, иглу 2, соединенную с исполнительным механизмом 3. Импульсатор 4, состоит из переменного дросселя 5, пневматической емкости 6 и пневматического реле. Измеритель времени истечения выполнен в виде преобразователя 7 силы, задатчиков 8 и 9 давления, элементов 10 и 11 сравнения, пневматического триггера 12 и пневматического реле 13, в сопловые камеры которого подаются давления разного уровня. Узел 14 суммирования, включает в себя ячейки 15 и 16 памяти, пятимембранный элемент 17 сравнения и задатчик 18. Узел 19 сравнения, включает в себя трехмембранный элемент 20 сравнения и задатчик 21. Узел 22 сброса состоит из дополнительного импульсатора 23 и двух нормально закрытых клапанов 24 и 25.

Дополнительный импульсатор содержит переменный дроссель 26, пневматическую емкость 27 и пневматическое реле 28.

В камеры трехмембранных реле 13, 28 и 29, ячеек 14 и 16 памяти, клапанов 24 и 25 подведено давление подпора.

В начальный момент жидкость в полости измерительного сосуда 1 отсутствует. На вход преобразователя 7 воздействует минимальная сила, а, следовательно, на его выходе будет минимальное давление, которое поступает в отрицательную камеру элемента 10 и в положительную камеру элемента 11 сравнения. Давление, устанавливаемое задатчиками 8 и 9, соответствует минимальному (максимальному) весу измерительного сосуда 1. В начальный момент давление с выхода преобразователя 7 меньше давлений, устанавливаемых задатчиками 8 и 9. Поэтому на выходе элемента 10 сравнения появляется сигнал единичного уровня, а на выходе элемента 11 – нулевого. При таких входных сигналах триггер 12 имеет на своем выходе нулевой сигнал. Пневматическое реле 13 под действием подпора занимает такое положение, при котором верхнее сопло закрыто, а нижнее

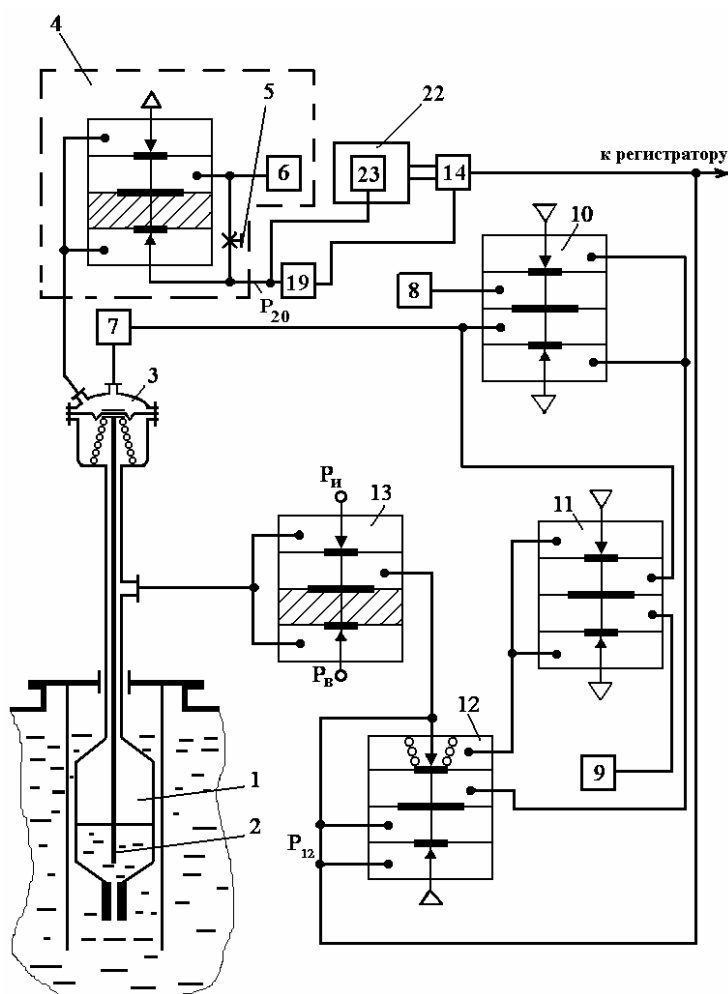
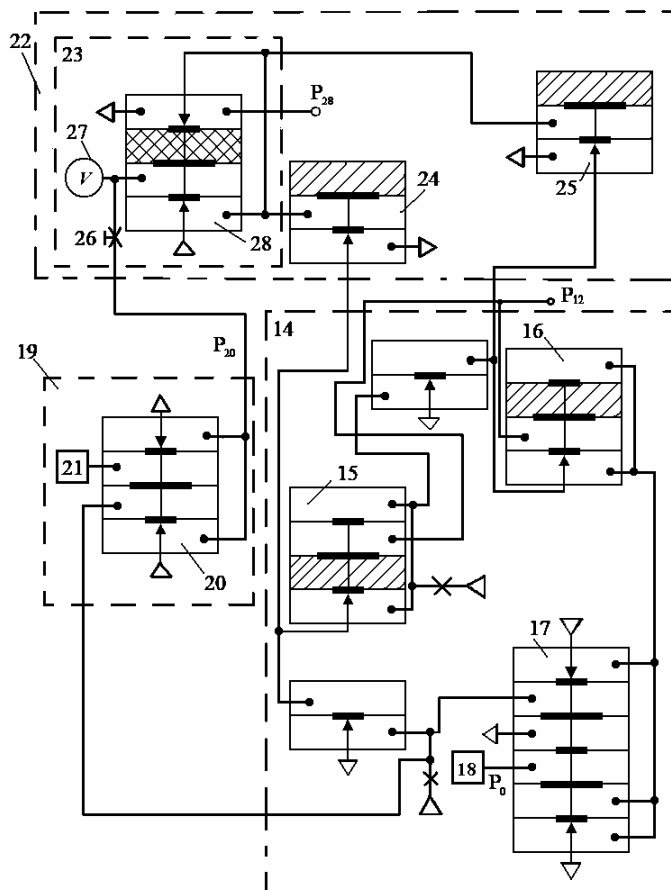


Рис. 2.12. Принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости с выбором интервала между процессами чистки капилляра

сопло открыто. Через это сопло в полость измерительного сосуда 1 подается вакуум  $P_v$ , величина которого постоянна.

Контролируемая жидкость под действием созданного перепада давления начинает натекает в измерительный сосуд 1. По мере натекания жидкости в сосуд 1 увеличивается сила, действующая на выход преобразователя 7, следовательно, и давление на его выходе. Как только давление на выходе преобразователя 7 становится больше давления задатчика 9, на выходе элемента 11 сравнения появляется единичный сигнал, переводящий триггер в положение, при котором на его выходе будет сигнал единичного уровня. Этот сигнал, поступая на вход пневматического реле 13, перемещает мембранный блок, закрывая нижнее сопло и открывая верхнее сопло. В сосуд 1 поступает избыточное давление  $P_g$  и под его действием начинается истечение жидкости.

По мере вытеснения жидкости уменьшается сила, действующая на вход преобразователя 7, вследствие чего давление происходит до тех пор, пока его значение не станет меньше давления, устанавливаемого задатчиком 8. При этом на выходе элемента 10 сравнения появляется сигнал еди-



**Рис. 2.13. Принципиальная пневматическая схема блоков 14, 19, 22, 23**

ничного уровня. Под действием этого сигнала триггер 12 занимает такое положение, при котором на его выходе будет нулевой сигнал. Мембранный блок пневмореле 13 под действием подпора перемещается вверх, соединяя при этом полость измерительного сосуда 1 с линией вакуума  $P_v$ . Вновь начинается процесс натекания жидкости в измерительный сосуд 1.

С выхода триггера 12 в процессе измерения наступают на вторичный прибор импульсы прямоугольной формы, частота следования которых зависит от вязкости.

В процессе измерения происходит образование пленки в капилляре. Практически для каждой исследуемой жидкости можно оценить время, через которое целесообразно осуществить чистку капилляра (экспериментально определить). Узлы 14 и 19 суммирования и сравнения соответственно осуществляют автоматическое управление чисткой капилляра.

При истечении жидкости через капилляр на выходе триггера 12 сохраняется сигнал единичного уровня  $P_{12} = 1$ . Этот сигнал перемещает вверх мембранный блок ячейки 16 памяти и сигнал с выхода элемента 17, равный давлению  $P_0$  задатчика 18, поступает на выход ячейки памяти 16. При окончании измерения происходит процесс натекания жидкости в сосуд 1 ( $P_{12} = 0$ ). Мембранный блок ячейки 15 памяти под действием подпора поднимается вверх и сигнал  $P_0$  с выхода ячейки 16 памяти поступает на выход ячейки 15 памяти. Тогда на выходе элемента 17 появится сигнал  $2P_0$ . Вновь начинается процесс измерения ( $P_{12} = 1$ ). Сигнал  $P_{12} = 1$  переместит вниз (вверх) мембранный блок в ячейке 15 (16) памяти. На выходе ячейки 16 памяти сигнал станет равным  $2P_0$ . После окончания измерения начинается процесс натекания жидкости в сосуд 1 ( $P_{12} = 0$ ). Под действием подпора мембранный блок ячейки 15 памяти поднимается вверх и сигнал  $2P_0$  пройдет на выход этой ячейки памяти.

Таким образом, на выходе ячейки 15 памяти формируется давление  $P_{19}$

$$P_{19} = N P_0,$$

где  $N$  – число циклов измерений.



С помощью датчиков 18 и 21 задается интервал времени разрушения полимеризационной пленки в капилляре с помощью иглы 2.

При повышении давления  $P_{25}$  давления датчика 21 на выходе элемента 20 появляется сигнал единичного импульса ( $P_{20} = 1$ ). Сигнал  $P_{20} = 1$ , пройдя импульсатор 4, поступает в исполнительный механизм 3, который перемещает иглу 2, разрушающую пленку жидкости. Одновременно сигнал  $P_{20} = 1$  поступает через дроссель 26 в пневматическую емкость 27 и положительную камеру пневматического реле 28 импульсатора, который сдвигает импульс  $P_{20} = 1$ . Единичный импульс с выхода пневматического реле 28 ( $P_{28} = 1$ ) открывает клапаны 24 и 25.

Давление в емкостях ячеек 15 и 16 памяти стравится в атмосферу. После окончания единичного импульса  $P_{28} = 1$  клапаны 24 и 25 закрываются. Вновь начинается процесс подсчета импульсов  $P_{12} = 1$ .

Использование устройства в промышленности позволяет упростить процесс измерения вязкости жидких веществ, обладающих повышенной пожаро- и взрывоопасностью и способностью образовывать полимеризационную пленку.

В процессе эксплуатации предлагаемого устройства в условиях химического цеха отпадает необходимость вручную подавать сигнал на разрушение пленки. Для каждой исследуемой жидкости можно подобрать рациональные интервалы разрушения пленки. Величины этого интервала выставляются датчиками 18 и 21.

### 2.6.3. Устройство для измерения вязкости с исключением влияния процесса чистки капилляра

Повышение надежности и точности измерений вязкости с помощью устройства [85] может быть достигнуто путем исключения влияния процесса чистки капилляра на показания прибора.

На рис. 2.14 приведена принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости [62].

Устройство для измерения вязкости жидкостей состоит из измерительного сосуда 1 с капилляром, иглы 2, исполнительного механизма 3, импульсатора 4, измерителя времени истечения в виде преобразователя 5 силы, двухпозиционного регулятора 6, первого пневматического реле 7 и второго пневмореле 8. В сопловые камеры реле 7 и 8 подаются сигналы разного уровня – избыточное давление  $P_H$  и вакуум  $P_B$ . Измерительный сосуд 1 имеет кромки 9, затвор 10 с капилляром 11, пружину 12. К мембране 13 исполнительного механизма 3 присоединена игла 2 с упором 14. В нижней камере исполнительного механизма 3 установлена пружина 15. Измерительный сосуд 1 снабжен клапаном 16, установленным в нижней части сосуда 1. Капилляр 11 размещен в центре затвора 10 клапана 16.

Пусть в начальный момент времени жидкость в измерительном сосуде 1 отсутствует. На выходе  $P_5$  преобразователя 5 давление минимального уровня. Поэтому на выходе  $P_6$  двухпозиционного регулятора 6 сигнал равен нулю (регулятор имеет настройку на максимум). Под действием подпора мембранные блоки реле 7 и 8 опускаются вниз. В верхнюю камеру исполнительного механизма 3 через открытое сопло пневматического реле 8 подается избыточное давление  $P_H$ , а в нижнюю камеру через открытое сопло реле 7 – вакуум  $P_B$ . Под действием давления  $P_H$  мембрана 13 опускается вниз, игла 2 входит в капилляр 11 и, опускаясь ниже уровня капилляра, разрушает пленку, образующую в капилляре 11. Упор 14 иглы 2 перемещает вниз затвор 10, отодвигая его от кромок 9.

Жидкость через образованное отверстие под действием разности давлений в аппарате и сосуде 1 начинает натекать в измерительный сосуд 1.

Как только в измерительный сосуд 1 натечет заданное количество жидкости, давление  $P_6$  на выходе регулятора 6 становится равным единице. Под действием сигнала  $P_6 = 1$  мембранный блок пневматического реле 8 поднимается и в верхнюю камеру исполнительного механизма 3 поступит вакуум  $P_B$ . Под действием пружины 15 мембрана 13 и игла 2 перемещаются вверх. Пружина 12 поднимает затвор 10 вверх до кромок 9.

Импульсатор 4 сдвигает передний фронт сигнала  $P_6 = 1$ . Импульсатор 4 возможно построить по хорошо известным схемам [40], например, из пневматического реле, переменного дросселя и пневматической емкости. За время задержки переднего фронта импульса  $P_6 = 1$  затвор 10 поднимается вверх до кромок 9.

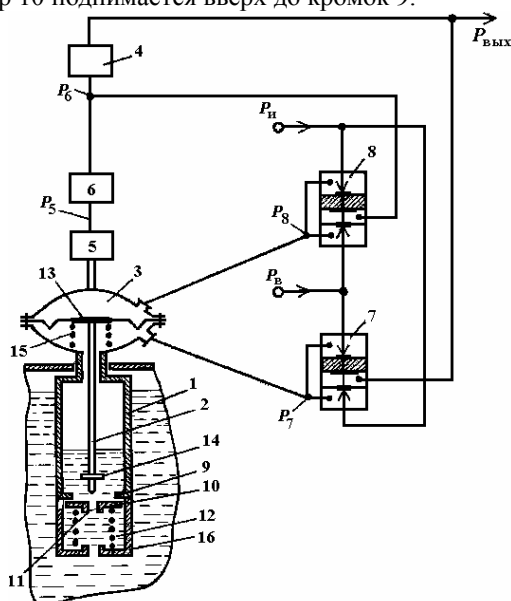


Рис. 2.14. Устройство для измерения вязкости с одновременным проведением процессов заполнения измерительной емкости и чистки капилляра

После окончания времени задержки давление на выходе устройства становится равным единице  $P_{\text{вых}} = 1$ . Под действием импульса  $P_{\text{вых}} = 1$  мембранный блок пневматического реле 1 поднимается вверх и давление  $P_{\text{и}}$  подается в нижнюю камеру исполнительного механизма 3. Начинается процесс измерения вязкости. Под действием давления  $P_{\text{и}}$  контролируемая жидкость продавливается через капилляр 11. По мере вытекания жидкости из измерительного сосуда 1 сигнал с выхода преобразователя 5 уменьшается. При достижении давлением минимального значения срабатывает регулятор 6 и на его выходе появляется сигнал  $P_6 = 0$ , что в свою очередь приводит к появлению на выходе устройства сигнала  $P_{\text{вых}} = 0$ . Под действием подпора мембранные блоки пневматических реле 7 и 8 опускаются вниз и в верхнюю (нижнюю) камеру исполнительного механизма 3 подается давление  $P_{\text{и}}$  ( $P_{\text{в}}$ ). Вновь начинается процесс заполнения измерительного сосуда 1.

Таким образом, процесс работы устройства складывается из трех составляющих: наполнение, закрытие затвора 10, измерение вязкости.

В процессе работы устройства на выходе образуются импульсы  $P_{\text{вых}} = 1$ , частота следования которых зависит от вязкости контролируемой жидкости.

При работе устройства повышается надежность и точность измерения вязкости контролируемой жидкости. Повышение надежности измерений обусловлено тем фактом, что в каждом цикле измерений происходит разрушение полимеризационной пленки контролируемой жидкости. Повышение точности измерений происходит путем исключения влияния процесса чистки капилляра на показания вторичного прибора. Стадия заполнения измерительного сосуда контролируемой жидкостью значительно сокращена за счет того, что при движении затвора вниз образуется отверстие, пропускная способность которого значительно выше пропускной способности капилляра. Тем самым сокращено время одного цикла измерения вязкости, следовательно, за один и тот же интервал времени устройство позволит сделать большее количество замеров. Поэтому оператор имеет возможность следить за характером изменения вязкости и в меньшие промежутки времени.

При работе устройства для измерения вязкости в автоматической системе регулирования процесс чистки капилляра не будет оказывать влияния на динамику процесса регулирования

#### **2.6.4. Устройство для измерения вязкости с автоматической чисткой и промывкой капилляра**

Устройства для измерения вязкости с чисткой капилляра [62, 63, 85] обладают недостаточной надежностью измерения вязкости жидкостей, склонных к образованию на поверхности капилляра трудно счищаемых пленок. Тогда при движении вниз иглы не происходит полного очищения капилляра. Процесс истечения жидкости при этом будет происходить через капилляр, диаметр которого отличается от расчетного. Это является источником погрешности измерения. Возможно и полное закрытие капилляра пленкой, что приводит к отказу устройства.

На рис. 2.15 приведена принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости с чисткой и промывкой капилляра.

Устройство для измерения вязкости жидкостей содержит измерительный сосуд 1, иглу 2, соединенную с мембраной исполнительного механизма 3, импульсатор 4, соединенный с вторичным прибором (на рис. 2.15 не показан). Исполнительный механизм 3 сочленен с измерителем времени истечения в виде преобразователя 5 силы, выход которого через двухпозиционный регулятор 6 подключен к входу импульсатора 4, выход которого также соединен с камерой управления первого пневматического реле 7, соединенного через нижнюю камеру исполнительного механизма 3 с измерительным сосудом 1. Выход двухпозиционного регулятора 6 также подключен к камере управления второго пневматического реле 8, выход которого соединен с верхней камерой исполнительного механизма 3. Сопла пневматических реле 7 и 8 подключены к линиям давлений различного уровня – избыточного давления  $P_{\text{и}}$  и вакуума  $P_{\text{в}}$ . Измерительный сосуд имеет кромки 9, в которые упирается затвор 10, имеющий капилляр 11, расположенный в центре затвора 10, подпружиненного пружиной 12. К мембране 13 исполнительного механизма 3 присоединена игла 2 с упором 14, в нижней камере которого установлена пружина 15. Клапан 16 установлен в нижней части сосуда 1. Нижний штуцер емкости 17 соединен гибким шлангом 18 с верхней частью иглы 2 имеющей полый канал 19, а верхний штуцер емкости 17 через регулятор 20 уровня жидкости соединен с трубопроводом подачи жидкости. Выход первого пневматического реле 7 соединен с входом управления регулятора 20, а выход второго пневматического реле 8 – с входом управления пульсирующего пневматического сопротивления 21, вход которого соединен с задатчиком 22, а выход – с емкостью 17.

В начальный момент времени жидкость в измерительном сосуде 1 отсутствует. На выходе преобразователя 5 силы ( $P_5$ ) давление минимального уровня. Поэтому на выходе двухпозиционного регулятора 6 ( $P_6$ ) сигнал равен нулю (регулятор 6 имеет настройку на максимум). Под давлением подпора мембранные блоки пневматических реле 7 и 8 перемещаются вниз. В верхнюю камеру исполнительного механизма 3 через открытое сопло пневматического реле 8 подается избыточное давление  $P_{\text{и}}$ , а в нижнюю камеру через открытое сопло пневматического реле 7 – вакуум  $P_{\text{в}}$ . Под действием давления  $P_{\text{и}}$  и мембрана 13 опускается, нижняя часть иглы 2 входит в капилляр 11, и растворитель из емкости 17 через полый канал 19

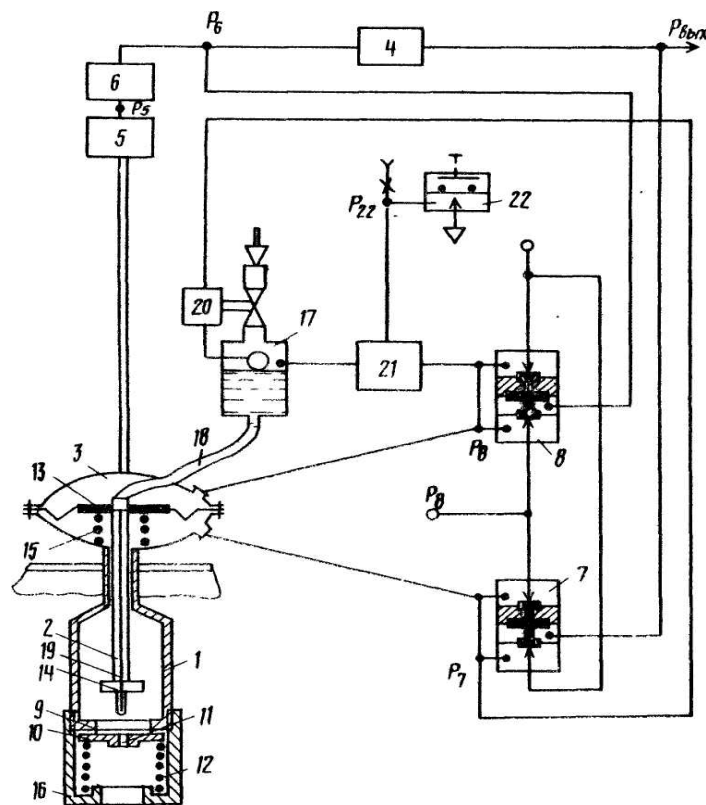


Рис. 2.15. Устройство для измерения вязкости с чисткой и промывкой капилляра

поступает на стенки капилляра 11, растворяя пленку измеряемой жидкости. Игла 2 счищает продукты растворения со стенок капилляра 11. Для того, чтобы из емкости 17 в капилляр 11 за один цикл очистки поступала заданная порция растворителя, используется регулятор 20, пульсирующее пневматическое сопротивление 21 и задатчик 22. В емкости 17 устанавливаем требуемый уровень растворителя. С помощью задатчика 22 устанавливаем требуемую порцию воздуха, накапливаемую в емкости пульсирующего пневматического сопротивления 21. При  $P_0 = P_n$  эта порция воздуха проходит в емкость 17 и повышает давление в ней. Под действием этого давления заданная доза растворителя поступает через шланг 18, полый канал 19 иглы 2 в капилляр 11 затвора 10 клапана 16.

В емкости пульсирующего пневматического сопротивления 21 накапливается количество воздуха

$$u = \frac{V_{21}}{RQ} P_{22},$$

где  $V_{21}$  – объем емкости пульсирующего пневматического сопротивления 21;  $Q$  – абсолютная температура воздуха;  $P_{22}$  – давление на выходе задатчика 22.

Под действием разности давлений  $P_{17}^* - P_{17}$  из емкости 17 выдавливается в капилляр 11 заданная доза растворителя, величину которой можно изменять с помощью задатчика 22.

Упор 14 иглы 2 перемещает вниз затвор 10, отодвигая его от кромок 9. Жидкость через образованное отверстие под действием разности давлений в аппарате и в сосуде 1 натекает в измерительный сосуд 1. По мере поступления жидкости в сосуд 1 давление на выходе преобразователя 5 силы возрастает. Как только в сосуд 1 натечет заданное количество жидкости, давление  $P_6$  на выходе регулятора 6 становится равным единице. Под действием сигнала  $P_6 = 1$  мембранный блок пневматического реле 8 поднимается вверх и в верхнюю камеру исполнительного механизма 3 поступает вакуум  $P_v$ . Под действием пружины 15 мембрана 13 и игла 2 поднимаются вверх. Пружина 12 поднимает затвор 10 вверх до кромок 9. Импульсатор 4 сдвигает передний фронт сигнала  $P_6 = 1$  на интервал времени, необходимый для поднятия затвора 10.

При соединении емкости 17 с пульсирующим пневматическим сопротивлением 21 в ней устанавливается давление  $P_{17}^*$ , которое определяется выражением

$$P_{17}^* = P_{17} \frac{V_{17}}{V_{17} + V_{21}} + P_{22} \frac{V_{21}}{V_{17} + V_{21}},$$

где  $P_{17}$  – давление воздуха в емкости 17 до соединения;  $V_{17}$  – объем воздушного пространства в емкости 17 над растворителем.

После окончания времени задержки давление на выходе устройства становится равным единице. Под действием сигнала  $P_{\text{вых}} = 1$  мембранный блок пневматического реле 7 поднимается и давление  $P_n$  поступит в нижнюю камеру механизма 3. Начинается процесс измерения вязкости жидкости. Под действием избыточного давления контролируемая жидкость продавливается через капилляр 11. Сигнал  $P_7 = P_n$  приводит в действие регулятор 20, который наполняет емкость 17

растворителем до первоначального уровня. Тем самым обеспечивается постоянство объема  $V_{17}$  в момент соединения пульсирующего пневматического сопротивления 21 и емкости 17. Это обеспечивает постоянство дозы растворителя, поступающего в капилляр 11.

По мере вытекания жидкости из измерительного сосуда 1 сигнал с выхода преобразователя 5 силы уменьшается. При достижении давлением минимального значения срабатывает регулятор 6 и на его выходе появляется сигнал  $P_6 = 0$ , что, в свою очередь, приводит к появлению на выходе устройства сигнала  $P_{\text{вых}} = 0$ . Под действием подпора мембранные блоки пневматических реле 7 и 8 опускаются и в верхнюю (нижнюю) камеру исполнительного механизма 3 подается давление  $P_{\text{н}}$  ( $P_{\text{в}}$ ). Вновь начинается процесс заполнения измерительного сосуда 1 и чистка капилляра 11. Работа устройства складывается из трех составляющих: наполнение и чистка, закрытие затвора, измерение вязкости. В процессе работы устройства на выходе образуются импульсы  $P_{\text{вых}} = 1$ , частота следования которых зависит от вязкости контролируемой жидкости.

Рассмотренное выше устройство для измерения вязкости позволяет осуществлять надежное измерение жидкостей, образующих на поверхности капилляра прочные пленки. Такое измерение стало возможным вследствие того, что с помощью иглы с подачей растворителя прочищается капилляр и не происходит его полная или частичная закупорка. Таким образом, точность повышается потому, что каждый цикл измерения начинается при одинаковой величине диаметра капилляра.

### 3. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЛИЧЕСТВА ГАЗА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

#### 3.1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ПО ВЕЛИЧИНЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДАВЛЕНИЯ

В устройствах, реализующих метод измерения времени истечения по изменению выталкивающей силы, действующей на измерительный элемент, необходимо обеспечивать подвижность измерительного элемента при вертикальном его расположении. В ряде производств такие требования выполнить не представляется возможным. Для обеспечения контроля вязкости внутри реакционного аппарата измерения должны осуществляться при помощи жестко закрепленного измерительного элемента.

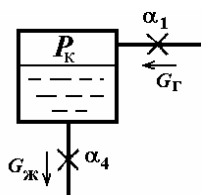


Рис. 3.1. Схема пневмогидравлического измерительного элемента

Рассмотрим аэрогидродинамические процессы, происходящие в пневмогидравлическом измерительном элементе (рис. 3.1) при условии жесткого его закрепления и подачи на его вход газа с постоянным расходом.

При подаче постоянного массового расхода  $G_1$  на вход измерительного элемента погружного типа система дифференциальных уравнений (1.29) с соответствующими коэффициентами, значения которых представлены в табл. 1.1, примет вид

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -\frac{\alpha_4 g}{S} h + \frac{\alpha_4}{S \rho_{\text{ж}}} (\bar{P}_{\text{к}} - P_{\text{а}}) - \frac{\alpha_4 g (H - l)}{S}, \\ \bar{P}_{\text{к}} \frac{dh}{dt} + h \frac{dP_{\text{к}}}{dt} = \frac{RT}{S} G_1. \end{cases} \quad (3.1)$$

Физическая особенность рассматриваемой пневмогидравлической системы при подаче на ее вход газа с постоянным расходом заключается в том, что после окончания переходного процесса в статическом режиме течения газа и жидкости давление  $P_{\text{к}}$  в измерительной емкости становится постоянным, при этом  $\frac{dP_{\text{к}}}{dt} = 0$ . Расходы газа  $Q_{\text{г}}$  и жидкости  $Q_{\text{ж}}$  будут неизменными и равными

$$Q_{\text{г}} = Q_{\text{ж}}. \quad (3.2)$$

Из второго уравнения системы (3.1)

$$S \frac{dh}{dt} = \frac{G_1 RT}{\bar{P}_{\text{к}}} = Q_{\text{г}}. \quad (3.3)$$

При условии, что

$$\rho_{\text{ж}} g (H - l + h) \ll P_{\text{к}}$$

из первого уравнения системы (3.1) получим

$$S \frac{dh}{dt} = \frac{\alpha_4}{\rho_{\text{ж}}} (P_{\text{к}} - \bar{P}_{\text{а}}) = Q_{\text{ж}}. \quad (3.4)$$

Учитывая (3.2) из (3.3) и (3.4) получим

$$Q_{\text{г}} = \frac{\alpha_4}{\rho_{\text{ж}}} (P_{\text{к}} - \bar{P}_{\text{а}}). \quad (3.5)$$

Так как

$$\alpha_4 = \frac{\pi d_1^4 \rho_{\text{ж}}}{128 \eta_{\text{ж}} l},$$

то

$$Q_r = \frac{\pi d_1^4}{128 \eta_{ж} l} \Delta P$$

или

$$\Delta P = \frac{128 l Q_r}{\pi d_1^4} \eta_{ж} \quad (3.6)$$

Таким образом, из уравнения (3.6) следует, что, подавая в емкость измерительного элемента газ с постоянным расходом, измеряют значение давления в установившемся режиме течения, по которому определяют вязкость контролируемой жидкости.

На рис. 3.2 изображена схема устройства, реализующего метод измерения вязкости при  $G_r = \text{const}$ .

Некоторый объем контролируемой жидкости 1 подается в измерительную емкость 2 и вытекает из нее по капиллярной трубке 3. К верхней части измерительной емкости 1 подключен манометр 4, камера Б повторителя со сдвигом 5 и выход регулируемого пневматического сопротивления 6 с проводимостью  $\beta$ . Давление питания подается через постоянный дроссель 7.

Газ через пневматическое сопротивление 6 с расходом

$$G_6 = \beta(P_A - P_B),$$

где  $P_A$  – давление в камере А повторителя со сдвигом 5, подается в измерительную емкость 2.

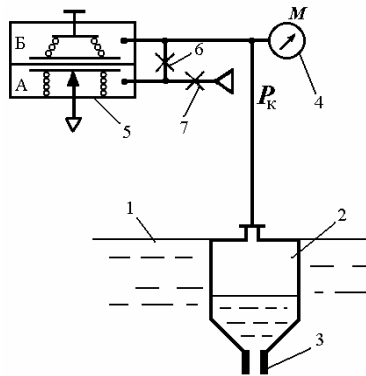


РИС. 3.2. СХЕМА УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА измерения вязкости при  $G_r = \text{const}$

Камеры А и Б соединены между собой через пневматическое сопротивление 6. Разность давлений  $\Delta P = (P_A - P_B)$  является постоянной величиной, значение которой изменяется путем изменения настройки  $\Delta$  повторителя со сдвигом.

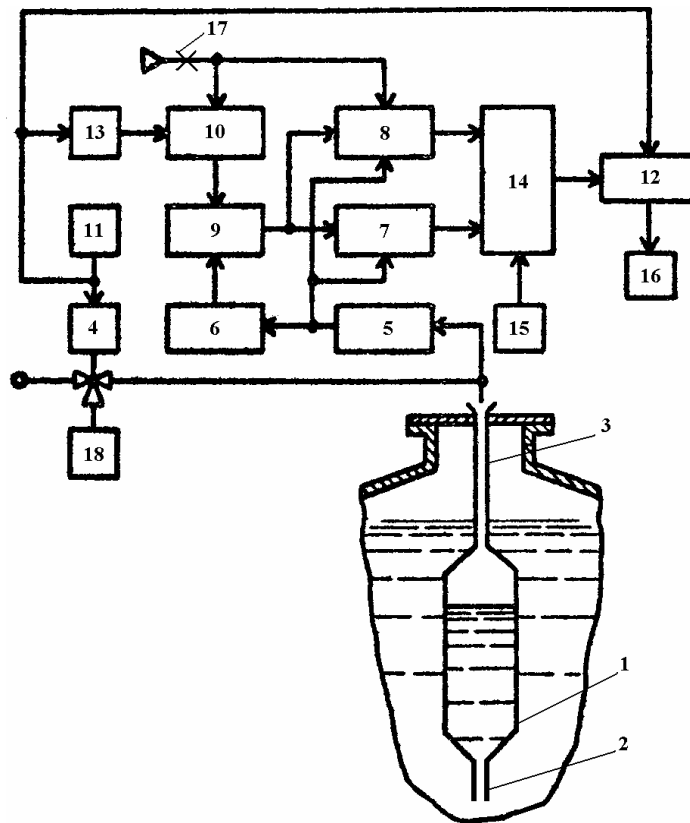
Так как  $G_6 = \beta \Delta = \text{const}$ , то фиксируя давление в емкости 2 и используя при этом манометр 4, о вязкости контролируемой жидкости судят по значению установившегося давления.

### 3.2. УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТАХ ПО ВЕЛИЧИНЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РАСХОДЕ ГАЗА НА ВХОДЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

При автоматическом контроле вязкости жидкостей в технологическом аппарате, как правило, не только осуществляется реализация метода измерения, но и осуществляется компенсация или коррекция некоторых неконтролируемых величин, оказывающих наибольшее влияние на получаемый результат. При реализации метода измерения вязкости с подачей непрерывного расхода на вход измерительного элемента необходимо исключить влияние изменения давления над поверхностью жидкости и гидростатического давления жидкости на результат измерений. Эта задача решена в рассматриваемом ниже устройстве контроля вязкости жидкостей.

На рис. 3.3 изображена функциональная схема устройства для измерения вязкости, на рис. 3.4 – его принципиальная пневматическая схема, на рис. 3.5 – временная диаграмма работы.

Устройство содержит измерительный сосуд 1 с капилляром 2 и газоподводящей трубкой 3, соединенной с выходом трехходового клапана 4 и входом звена 5 предварения, выход которого соединен с входом усилителя давления 6 и с входами узлов памяти 7 и 8. Выход усилителя 6 соединен с первым входом трехмембранного пневматического реле 9, реализующего логическую функцию «запрет», выход которого соединен с управляющими входами узлов памяти 7 и 8, а второй вход реле 9 соединен с выходом логического элемента И 10. Выход генератора 11 прямоугольных колебаний соединен с исполнительным механизмом клапана 4, с управляющим входом блока 12 непрерывной задержки на такт и с входом инерционного звена 13, выход которого соединен с первым входом элемента 10. Выходы



**Рис. 3.3. Функциональная схема устройства для измерения вязкости**

узлов памяти 7 и 8 соединены с плюсовой и минусовой камерами пятимембранного элемента сравнения 14, другая плюсовая камера которого соединена с задатчиком 15, а выход – с входом блока 12, выход которого соединен с входом вторичного прибора 16. Междроссельная камера, образованная дросселем 17 и соплом трехмембранного реле узла памяти 8, соединена со вторым входом пневматического реле 10. Один вход трехходового клапана 4 соединен с выходом регулятора 18 расхода воздуха, а второй вход – с атмосферой или линией вакуума.

Звено предварения 5 построено на трехмембранном элементе сравнения 19, переменном дросселе 20 и пневматической емкости 21. Узел памяти 7 (8) построен на трехмембранном реле 22 (23) и повторителе 24 (25) с постоянным дросселем. Инерционное звено 13 содержит переменный дроссель 26 и пневматическую емкость 27.

Устройство для измерения вязкости жидкостей работает следующим образом. Пусть измерительный сосуд 1 заполнен контролируемой жидкостью. Клапан 4 соединяет газоподводящую трубку 3 с атмосферой ( $P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = P_{11} = P_{13}$ ,  $P_{\text{вых}} = 0$ ,  $P_{14} = P_{15} > 0$ ).

Сигнал  $P_{11} = 1$ , действуя на клапан 4, соединит трубку 3 с регулятором 18. В сосуд 1 начинает поступать воздух с постоянным расходом  $Q$ . Давление  $P_1$  растет (отрезок 0–1 на рис. 3.5), вследствие чего жидкость вытесняется из сосуда 1 через капилляр 2 в технологический аппарат. Через некоторое время давление  $P_1$  стабилизируется на значении (отрезок 1–2), зависящем от вязкости жидкости, давления  $P_a$  в аппарате и гидростатического давления  $P_r$ . Эта зависимость имеет следующий вид:

$$P_1 = \frac{128lQ}{\pi d^4} \eta_{\text{ж}} + P_a + P_r, \quad (3.7)$$

где  $l$  и  $d$  – длина и диаметр капилляра 2.

Изменение давления на выходе звена предварения 5 описывается уравнением

$$\tau_5 \frac{dP_1}{dt} + P_1 = P_5, \quad (3.8)$$

где  $\tau_5 = \frac{V_{21}}{\alpha_{20} R \Theta}$  – постоянная времени;  $V_{21}$  – объем пневматической емкости 21;  $\alpha_{20}$  – проводимость дросселя 20;  $\Theta$  –

абсолютная температура газа.

В установившемся режиме истечения жидкости из сосуда 1 справедливо равенство  $P_4 = P_5$ .

$$(3.9)$$

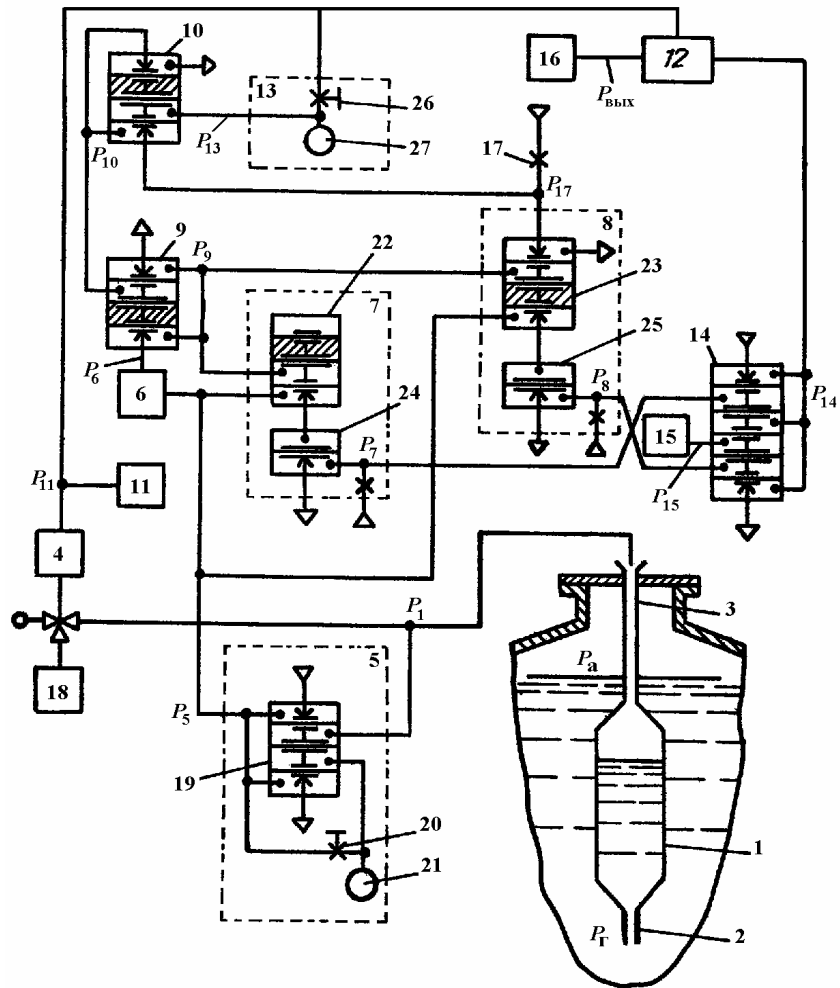


Рис. 3.4. Принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости

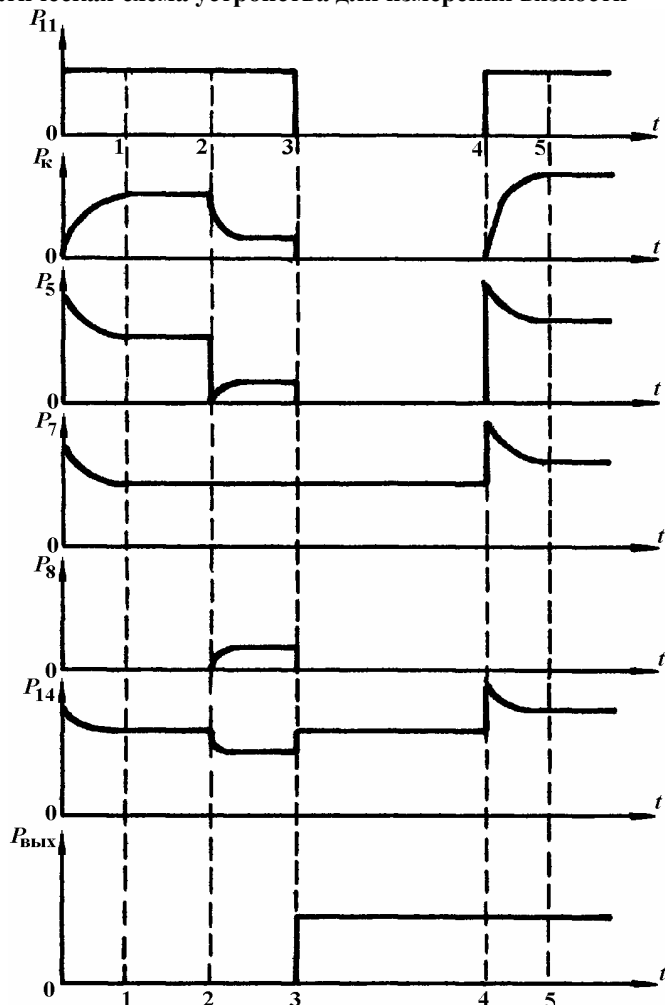


Рис. 3.5. Временная диаграмма работы устройства для измерения вязкости

Изменение давления на выходе инерционного звена 13 описывается уравнением

$$\tau_{13} \frac{dP_{13}}{dt} + P_{13} = 1. \quad (3.10)$$

после интегрирования которого получим

$$P_{13}(t) = 1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau_{13}}\right], \quad (3.11)$$

где  $\tau_{13} = \frac{V_{27}}{d_{26}R\Theta}$  – постоянная времени звена 13;  $V_{27}$  – объем пневматической емкости 27;  $\alpha_{26}$  – проводимость дросселя 26.

При возрастании давления  $P_4$  давление на выходе усилителя 6 становится равным единице ( $P = 1$ ). Тогда  $P_0 = 1$ , так как  $P_{10} = 0$ . Сигнал  $P_0 = 1$  соединяет вход узла памяти 7 с его выходом, и давление  $P_7$  повторяет входной сигнал  $P_5$ , одновременно отключая выход узла памяти 8 от своего входа.

Давление  $P_7$  на выходе узла памяти 7 в установившемся режиме истечения жидкости из сосуда 1 описывается уравнением

$$P_7 = \frac{128lQ}{\pi d^4} \eta_{ж} + P_a + P_r. \quad (3.12)$$

После истечения всей жидкости из сосуда 1 через капилляр 2 пойдет газ. Давление в сосуде 1 (отрезок 2 – 3 рис. 3.5) будет при этом равно

$$P_1 = P_a + P_r. \quad (3.13)$$

При поступлении такого давления  $P_4$  на вход звена предварения 5 на его выходе (в момент времени, соответствующий точке 2 рис. 3.5), будет давление нулевого уровня. Давление  $P_5 = 0$  запоминается в узле памяти 7. Под действием подпора мембранный блок реле 23 поднимается вверх, и давление  $P_8$  на выходе узла памяти 8 повторяет давление  $P_5$ . Давление  $P_{17}$  в междроссельной камере, образованной дросселем 17 и соплом реле 23, возрастает до давления питания ( $P_{17} = 1$ ), так как разрывается связь этой камеры с атмосферой. Давление  $P_{13}$  к этому моменту превышает давление подпора в реле 10. Поэтому мембранный блок реле 10 поднимается и давление  $P_{17} = 1$  проходит через открытое нижнее сопло реле 10 на его выход, т.е.  $P_{10} = P_{17} = 1$ .

Сигнал  $P = 1$  опустит мембранный блок реле 9 вниз, и давление  $P_d$  на выходе этого реле станет равным нулю. Сигнал  $P_9 = 0$  подтвердит состояние узлов памяти 7 и 8, несмотря на увеличение давления  $P_6$ .

На выходе узла памяти 8 в течение отрезка времени 2–3 (рис. 3.5) будет давление

$$P_8 = P_a + P_r. \quad (3.14)$$

На выходе сумматора 14 формируется давление

$$P_{14} = -P_8 + P_7 + P_{15}. \quad (3.15)$$

Задатчиком давления 15 генерируется давление  $P_{15} = 0,2 \cdot 10^5$  Па. Подставляя в (3.15) значения давлений из (3.14) и (3.12) получим

$$P_{14} = -(P_a + P_r) + \left(\frac{128lQ}{\pi d^4} \eta_{ж} + P_a + P_r\right) + 0,2 \cdot 10^5 = 0,2 \cdot 10^5 + \frac{128lQ}{\pi d^4} \eta_{ж}. \quad (3.16)$$

Давление  $P_{14}$  поступает на вход блока 12 непрерывной задержки на такт. При  $P_{14} = 1$  давление  $P_{\text{вых}}$  не проходит на выход блока 12.

После окончания действия импульса  $P_{11} = 1$  при  $P_{11} = 0$  (отрезок 3–4 рис. 3.5) клапан 4 займет такое положение, при котором сосуд 1 соединится с атмосферой ( $P_1 = 0$ ). Под действием разности давлений  $P_a - P_r$  через капилляр 2 в сосуд 1 будет поступать контролируемая жидкость.

На отрезке времени 3–4 (рис. 3.5)  $P_5 = 0$  и давление  $P_{13}$  изменяется от  $P_{11} = 1$  по экспоненте, т.е.

$$P_{13}(t) = P_{11} \exp\left[-\frac{t}{\tau_{13}}\right] \quad (3.17)$$

Давление  $P_{13}$  падает и становится меньше давления срабатывания пневматического реле 10. Поэтому мембранный блок опускается, и давление  $P_{10}$  становится равным нулю. Мембранный блок пневматического реле 9 под действием давления подпора поднимается. В узле памяти 7 запоминается входное давление, полученное в результате предыдущего цикла измерения, а на выходе узла памяти 8 будет давление  $P_8 = P_5 = 0$ .

Сигнал  $P_{11} = 0$  поступает на вход блока 12 непрерывной задержки на такт, при этом на его выходе запоминается давление, полученное в предыдущем цикле измерения. Это давление регистрируется вторичным прибором 16

$$P_{\text{вых}} = 0,2 \cdot 10^5 + \frac{128lQ}{\pi d^4} \eta_{ж} \quad (3.18)$$

Из последнего выражения следует, что при постоянных величинах  $l$ ,  $Q$ ,  $d$ ,  $\rho$  значение выходного давления пропорционально измеряемой величине вязкости жидкости.

Таким образом, применение устройства позволяет повысить точность измерения вязкости контролируемой жидкости, находящейся в технологическом аппарате.



Повышение точности измерения происходит вследствие того, что с помощью узла памяти 8 происходит запоминание суммы давлений  $P_a + P_r$  и эта сумма вычитается в сумматоре 14 от суммы давлений  $k\eta_{ж} + P_a + P_r$ , которая запоминается с помощью узла памяти 7. На выход устройства поступает давление, зависящее только от вязкости контролируемой жидкости.

### 3.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ С ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ПОДАЧЕЙ ГАЗА НА ВХОД ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

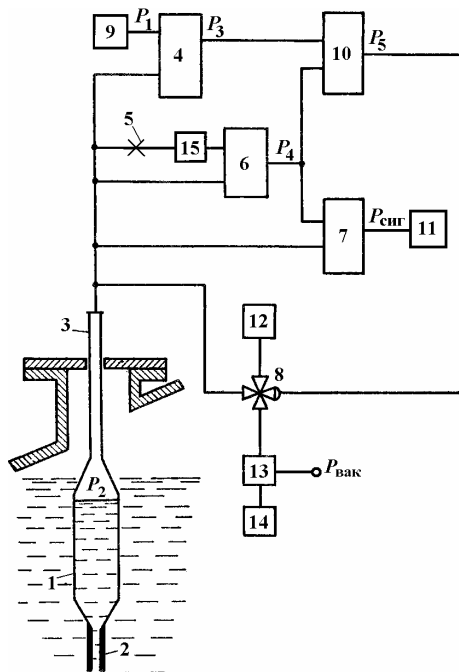
В автоматическом устройстве для измерения вязкости (п.п. 3.1, 3.2) массу газа в емкости измерительного элемента изменяют путем непрерывной подачи газа с расходом  $Q_r = \text{const}$ .

Устройство для измерения вязкости (рис. 3.6) состоит из измерительного сосуда 1, соединенного с капилляром 2 и газоподводящей трубкой 3. Газоподводящая трубка 3 соединена с одним из входов элемента 4 сравнения, дросселем 5, одним из входов элемента 6 сравнения, входом устройства 7 задержки на такт, выходом трехходового клапана 8. Ко второму входу элемента 4 сравнения подключен задатчик 9. Выход элемента 4 сравнения подключен к входу триггера 10, второй вход соединен с выходом элемента 6 сравнения, который в свою очередь подан на вход управления устройства задержки на такт, с выхода которого измерительный сигнал поступает на вторичный прибор 11.

Выход дросселя 5 соединен с пневматической камерой 15, выход которой подключен ко второму входу элемента 6 сравнения. Выход триггера 10 соединен с управляющим входом исполнительного механизма трехходового клапана 8, на один из входов которого подключен регулятор 12 расхода воздуха, а на другой вход – выход пульсирующего сопротивления (дросселя) 13. Вход пульсирующего сопротивления 13 соединен с линией вакуума или атмосферой. На управляющий вход пульсирующего сопротивления подключен выход генератора 14 прямоугольных импульсов.

Пульсирующий дроссель оформляется конструктивно как самостоятельный элемент – линейное пневматическое сопротивление. При рабочих давлениях нормального и высокого диапазонов проявляется сжимаемость воздуха.

Сравнительно недавно было предложено пульсирующее линейное сопротивление, расход воздуха через которое линейно зависит от перепада давлений [87, 88].



**Рис. 3.6. Функциональная схема устройства для измерения вязкости с пульсирующей подачей газа в емкость измерительного элемента**

Принципиальная схема пульсирующего сопротивления представлена на рис. 3.7, а. Сопротивление состоит из емкости  $V_1$  и двух пневматических контактов клапанов 1 и 2, осуществляющих поочередное подключение емкости  $V_1$  к входной линии с абсолютным давлением  $P_1$  и выходной линии с абсолютным давлением  $P_2$ .

Допустим, что контакт 1 замкнут, а контакт 2 разомкнут (это соответствует открытому клапану 1 и закрытому клапану 2). Тогда масса газа в емкости

$$M_1 = \frac{\bar{P}_1 V_1}{RT}.$$

Когда контакт 1 разомкнут, а контакт 2 замкнут, количество газа в емкости

$$M_2 = \frac{\bar{P}_2 V_1}{RT}.$$

Таким образом, в результате одного замыкания каждого из контактов в выходную линию из входной (при  $P_1 > P_2$ ) перетечет масса газа

$$\Delta M = M_1 - M_2 = \frac{V_1}{RT} (P_1 - P_2).$$

Если же каждый из контактов замкнется  $n$  раз, то в выходную линию из входной поступит масса газа

$$M = n\Delta M = \frac{V_1 n}{RT} (P_1 - P_2). \quad (3.19)$$

Продифференцируем равенство (3.19) по времени, предполагая, что  $P_1$  и  $P_2$  в каждом импульсе остаются постоянными

$$\frac{dM}{dt} = G = \frac{V_1}{RT} \frac{dn}{dt} (P_1 - P_2) = \frac{V_1 f}{RT} (P_1 - P_2),$$

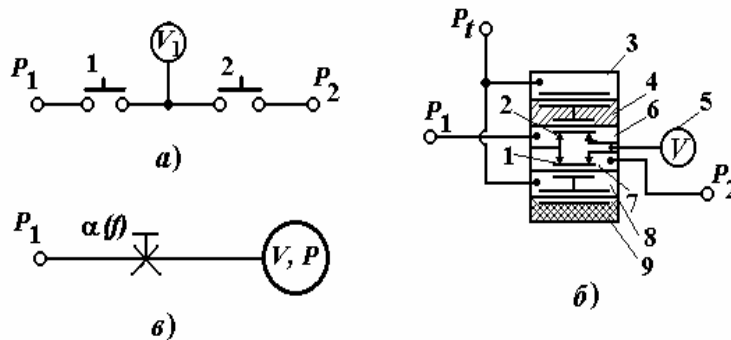
где  $\frac{dn}{dt}$  – частота замыкания контактов 1 и 2 (частота открытия клапанов).

Если частота остается постоянной, то

$$G = \alpha (P_1 - P_2),$$

где  $\alpha = \frac{V_1 f}{RT}$  – проводимость пульсирующего сопротивления, постоянная величина. Из этого выражения видно, что

проводимость сопротивления является функцией частоты  $f$ . Следовательно, сопротивление работает в дискретном режиме с частотой  $f$  синхронизирующего сигнала и при достаточно высокой частоте приближается к непрерывному и работает с погрешностью 0,5 %.



**Рис. 3.7. Пневматическое линейное пульсирующее сопротивление ПС:**

а – принципиальная схема ПС; б – конструктивная схема ПС;

в – схема аperiodического звена с ПС

Как следует из уравнения, пульсирующее сопротивление линейно при любых давлениях  $P_1$  и  $P_2$ .

Из сказанного ясно, что пульсирующее сопротивление позволяет работать во времени, протекающем как дискретно, так и с требуемым приближением непрерывно.

Проводимость сопротивления  $\alpha$  в реальном времени прямо пропорциональна частоте  $f$  сигнала управления и емкости  $V_1$ . Это позволяет изменять проводимость, изменяя частоту  $f$  и емкость  $V_1$ , т. е. управлять пульсирующим сопротивлением. Управляемость сопротивления дает возможность реализовать широкий класс линейных и нелинейных математических вычислительных операций, а также операции интегрирования и дифференцирования как дискретно, так и с требуемым приближением непрерывно во времени.

К контактам сопротивления, работающим в дискретном режиме, предъявляют высокие требования: они должны обеспечивать герметичность и большое число безотказных срабатываний.

Конструктивная схема пульсирующего сопротивления представлена на рис. 3.7, б. Сопротивление содержит четыре мембраны, которые попарно соединены штоками. Малые жесткие центры совместно с соплами образуют пары сопло-заслонка (контакты 1 и 2). Мембраны делят корпус пульсирующего сопротивления на шесть камер. В камеры 4 и 9 заводится давление подпора, в камеру 6 – давление  $P_1$ , из камеры 7 воздух поступает в выходную линию. Управляющие импульсы давления поступают с выхода генератора прямоугольных импульсов в камеры 3 и 8. При отсутствии управляющего давления в камерах 3 и 8 нижнее сопло оказывается закрытым, а верхнее открытым, и происходит заполнение камеры 5 (емкости  $V_1$ ) до давления  $P_1$ . При подаче управляющего импульса состояние пар сопло-заслонка изменится на обратное и произойдет опорожнение камеры 5 (объема  $V_1$ ) в выходную линию до давления  $P_2$ .

Схема аperiodического звена с пульсирующим сопротивлением представлена на рис. 3.7, в.

Масса воздуха в объеме  $V$  будет

$$M = \frac{\bar{P}}{RT} V,$$

а расход в этот объем

$$\frac{dM}{dt} = G = \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt}.$$

Тем обстоятельством, что объем пульсирующего дросселя суммируется с объемом аperiodического звена, мы пренебрегаем. С другой стороны, из уравнения для пульсирующего дросселя (3.19) следует, что

$$G = \frac{V_1}{RT} \frac{dn}{dt} (P_1 - P).$$

Приравнивая расходы, получим

$$N \frac{dP}{dn} + P = P_1, \quad (3.20)$$

где  $N = V/V_1$  – постоянная «времени»;  $V_1$  – объем камеры пульсирующего сопротивления;  $n$  – дискретное «время» (число импульсов).

Если принять, что  $P_1$  с момента отсчета времени постоянно и больше начального давления  $P$  в камере (при  $n = 0$ ), то решение уравнения (3.20) будет

$$P = P_1 \left( 1 - e^{-\frac{n}{N}} \right).$$

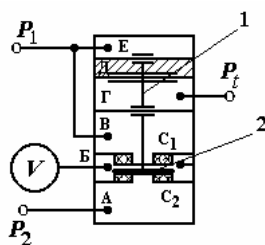
Процессы, происходящие в рассмотренном ППС, справедливы и для других конструкций.

На рис. 3.8 изображено пульсирующее пневматическое сопротивление с одним приводом и упругими соплами.

Устранение короткого замыкания достигается за счет предварительного сжатия исполнительного узла, соединяющего упругие сопла. Условие работоспособности является

$$ch_0 \geq \Delta p,$$

где  $c$  – жесткость упругих сопел по давлению приведенная к эффективной площади средней камеры;  $h$  – перемещение упругих элементов соответствующее их деформации при нейтральном положении управляющего узла.



**Рис. 3.8. Схема пульсирующего сопротивления с упругими соплами**

Замыкание контактов требует совершения хода  $h_3 > h_0$ , так как только в этом случае между соплом и заслонкой появится зазор и возрастает до  $\alpha_{\max}$  проводимость одного из контактов. Таким образом, для замыкания контактов необходимо преодолеть перепад

$$\Delta_3 = c(h_3 - h_0),$$

где  $(h_3 - h_0)$  – зазор, обеспечивающий проводимость замкнутого контакта.

Если упругие элементы при нейтральном положении привода не деформированы, то схема не устраняет сквозного протока (короткого замыкания).

ППС содержит трехмембранный привод, аналогичный мембранному блоку трехмембранную реле ППР.1, шток 1 которого соединен с заслонкой 2, расположенной между двумя предварительно деформированными упругими соплами  $C_1$  и  $C_2$ . Один вход  $P_1$  подключен в камеры В и Е, вход  $P_2$  подключен в камеру А, к камере Б присоединена емкость V.

Тактовые импульсы давления  $P_1$  поступают в камеру Г. В камеру Д подают давление подпора. При  $P_1 = 0$ , под действием подпора сопло  $C_2$  закрыто, а емкость V через открытое сопло  $C_1$  соединена с входом  $P_1$ , то сопло  $C_1$  закрыто заслонкой 2, а емкость V через открытое сопло  $C_2$  соединена с входом  $P_2$ . Таким образом, происходит дозированная передача газа с одного входа на другой. Такой процесс описывается аналогично изложенному выше.

Исключить короткое замыкание, т.е. сквозной проток газа, можно путем применения золотниковых элементов. Одна из конструкций ППС золотникового типа приведена на рис. 3.9.

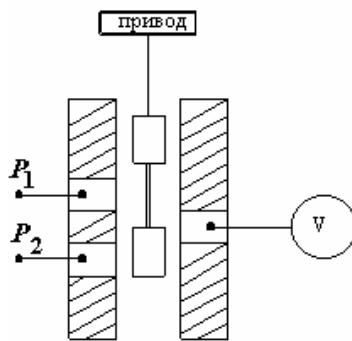
Привод управляется дискретным сигналом и, в зависимости от вида энергии этого сигнала, может быть пневматическим, гидравлическим, электрическим и т.д.

Плунжер золотниковой пары может занимать два положения, соединяя при этом линию  $P_1$  или  $P_2$  с емкостью V. Исключение короткого замыкания осуществляется за счет конструктивного выполнения золотниковой пары.

Кроме рассмотренных конструкций ППС существует ряд конструкций, особенностями которых является выполнение привода.

При конструировании устройств для измерения свойств веществ можно использовать различные схемы ППС. При этом хотелось бы отметить, что выбор той или иной схемы ППС не является принципиальным.

Рассмотрим работу устройства для измерения вязкости с пульсирующей подачей газа в емкость измерительного элемента (рис. 3.6).



**Рис. 3.9. Пульсирующее пневматическое сопротивление золотникового типа**

Пусть в начальный момент времени измерительный сосуд 1 не содержит измеряемой жидкости, при этом давление в сосуде  $P_2$  достигает установившегося максимального значения, соответствующего вязкости жидкости. В этом случае триггер 10 переключается в состояние, при котором трехходовой клапан 8 подключает через газоподводящую трубку полость измерительного сосуда к выходу пульсирующего сопротивления, на вход которого подано разрежение.

Давление  $P_2$  в сосуде в момент соединения его с разрежением падает. Под действием возникшего перепада давления жидкость натекает в измерительный сосуд. По мере заполнения жидкостью полости измерительного сосуда уменьшается объем, занимаемый газом. При этом увеличивается давление  $P_2$ . При равенстве давления  $P_2$  сумме давлений в реакционном аппарате и гидростатического перепада давления, под действием которого жидкость натекает в измерительный сосуд, становится равным нулю и жидкость устанавливается на элементарном уровне. По приходу очередного управляющего импульса от генератора процесс повторяется.

Как только давление  $P_2$  становится меньше давления  $P_1$ , устанавливаемого задатчиком 9, на выходе элемента 4 сравнения появляется единичный сигнал  $P_3 = 1$ , который поступает на один из входов триггера 10 и переключает его в состояние, при котором его выходной сигнал  $P_5 = 1$ , и на исполнительный механизм трехходового клапана. При этом трехходовой клапан соединяет выход регулятора расхода воздуха с газоподводящей трубкой 3. К этому моменту жидкость заполняет измерительный сосуд на определенный уровень.

При поступлении газа в измерительный сосуд давление  $P_2$  начинает расти. Давление  $P_2$  через дроссель 5 и емкость 15 подается на первый вход элемента 6 сравнения, а на второй его вход давление  $P_2$  поступает непосредственно. Сначала давление  $P_2$  возрастает, а затем устанавливается на определенном уровне, зависящем от вязкости жидкости. Так как давление  $P_2$  на один из входов элемента 6 сравнения подается непосредственно, а на другой его вход – через цепочку, состоящую из дросселя и емкости, то при изменении давления  $P_2$  в полости измерительного сосуда на входах элемента 6 сравнения перепад давления, который уменьшается по мере установления давления  $P_2$ , а при  $P_2 = \text{const}$  перепад давления на входах элемента сравнения становится равным нулю. В этом случае на выходе элемента 6 сравнения устанавливается давление  $P_4 = 1$ , которое переводит триггер 10 в состояние  $P_5 = 0$  и переключает тем самым трехходовой клапан на выход пульсирующего сопротивления. Далее устройство работает аналогично.

С выхода элемента 6 сравнения давление  $P_4$  поступает также на управляющий вход устройства задержки на такт, вход которого подключен к полости измерительного сосуда, выход устройства 7 задержки на такт подключен к входу вторичного прибора 11.

### 3.4. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ СО СТРУЙНОЙ ПОДАЧЕЙ ГАЗА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Принципиальная пневматическая схема устройства для непрерывного измерения вязкости жидкостей в аппаратах [89] представлена на рис. 3.10

Измерительная камера 1, выполнена в виде цилиндрической трубы, заканчивающейся сменной трубкой 2 истечения. Верхняя часть измерительной камеры подключена к входу пневматического знаочувствительного преобразующего каскада, содержащего пятимембранный суммирующий элемент 3, в камеру В которого поступает измеряемое давление. Давление питания через постоянные турбулентные дроссели 4 и 5 подается в сопла сумматора  $C_1$  и  $C_2$ . Выходы  $P_1$  и  $P_2$  из междроссельных камер подключены к камерам  $A_6$  и  $B_6$  пневматического триггера 6 с отдельными входами и через дроссельные делители 7 и 8 к камерам Д и Б отрицательной обратной связи элемента 3. Камеры  $A_3$ ,  $G_3$ ,  $E_3$  элемента 3 непосредственно, а камеры  $B_3$  и  $D_3$  через переменные дроссели делителей 8 и 7 сообщены с атмосферой.

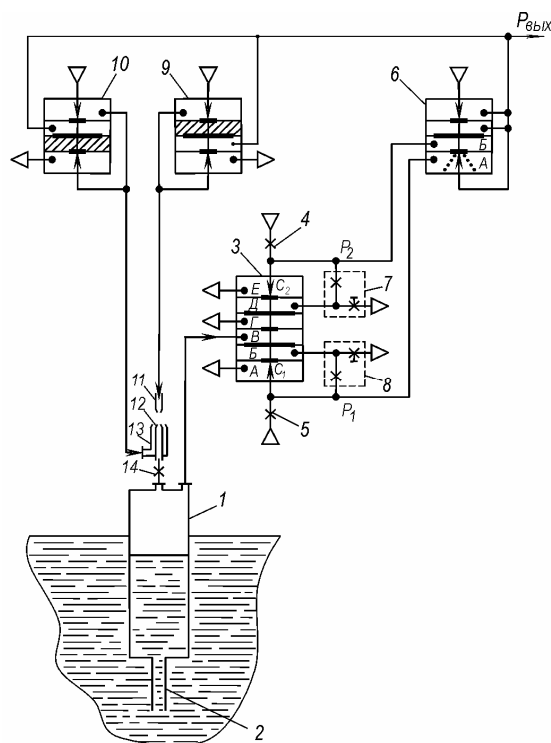
Выход пневматического триггера 6 соединен с управляющими камерами двух пневматических реле 9 и 10, реализующих соответственно операции «отрицания» и «повторения». Выход реле 9 подключен в сопло 11 струйного элемента «сопло – приемный канал», а выход реле 10 – в кольцевое эжекционное сопло 12 того же струйного элемента. Приемный канал 13 через дроссель 14 соединен с измерительной камерой 1. Выход триггера 6 может быть подсоединен к системе регистрации или автоматического регулирования.

Работает устройство для непрерывного измерения вязкости жидкостей в сосудах следующим образом.

Измерительную камеру 1 погружают в контролируемую жидкость.

В начальный момент давление внутри измерительной камеры и, следовательно, в камере В суммирующего элемента равно атмосферному. На выходах  $P_1$  и  $P_2$  пневматического знаочувствительного преобразующего каскада давление отсутствует.

Триггер 6 под действием пружины сохраняет нулевое состояние. В управляющие камеры реле 9 и 10 поступают нулевые сигналы. Под действием подпора реле 9 открывается, и давление питания через сопло 11, приемный канал 13 и дроссель 14 наполняет измерительную камеру 1. Давление в измерительной камере растет, вытесняя из нее



**Рис. 3.10. Принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости со струйной подачей газа в измерительный элемент**

жидкость и одновременно с этим воздействуя на мембранный блок суммирующего элемента 3. При этом изменяется зазор между соплом  $C_1$  и заслонкой, что приводит к росту давления  $P_1$  на выходе. Давление  $P_1$  через дроссельный делитель 8 поступает в камеру  $B_3$  отрицательной обратной связи и уравнивает входное давление, причем коэффициент усиления знакочувствительного преобразователя можно изменять путем изменения проводимости переменного дросселя делителя 8.

Как только давление  $P_1$  достигнет значения, способного переключить триггер 6 в новое устойчивое состояние, при котором на выходе его будет единичный сигнал, реле 9 закрывается, а реле 10 открывается. Давление сжатого воздуха поступает в кольцевое эжекционное сопло 12 струйного элемента «сопло–приемный канал». Под действием струи, вытекающей из сопла 12, происходит эжектирование газа из измерительной камеры, давление внутри которой уменьшается.

Эжектирование осуществляется до тех пор, пока разрежение в камере 1 не достигнет такого значения, при котором давление  $P_2$ , поступающее в камеру  $B_6$  триггера 6, переведет триггер в новое устойчивое состояние, т.е. когда на его выходе окажется нулевой сигнал. При поступлении сигнала

нулевого уровня на входы пневматических реле 9 и 10 вновь происходит заполнение измерительной камеры. Процесс повторяется. Частота переключений триггера определяется вязкостью жидкости. По результатам измерения вязкости жидких веществ судят о качестве продукции и ходе технологических процессов в пищевой, лакокрасочной, нефтехимической и других производствах.

### Аэрогидродинамическое устройство для измерения вязкости

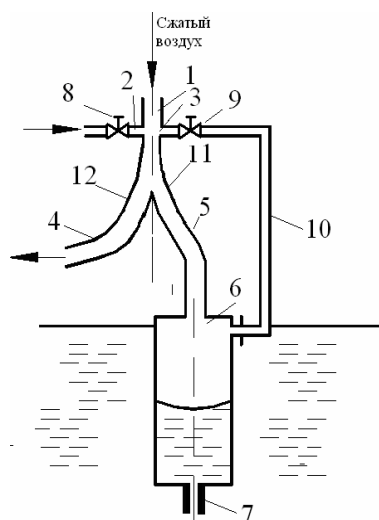
Во многих странах мира ведутся разработки и исследования, связанные с использованием элементов пневмоники при создании принципиально новых методов и средств контроля веществ, устройств управления процессами в различных областях действия человека [27, 31].

На рис. 3.11 представлена схема одного из аэрогидродинамических устройств контроля вязкости жидкостей, которое построено на одном струйном элементе, работающем с отрывом пограничного слоя потока, обтекающего стенку. В основу работы элемента положен аэродинамический эффект прилипания (притяжения) струи к стенке (эффект Коанда), суть которого состоит в том, что струя воздуха, вытекающая из питающего сопла 1 касается стенки 11 или 12 в некоторой точке и эжектирует воздух из зоны, ограниченной струей и стенкой. В результате в этой зоне создается пониженное давление, и струя газа прилипает к стенке. При подаче некоторого управляющего давления  $P_{упр} \neq 0$  в канал 2 или 3 и по мере его увеличения нарушается основное условие прилипания струи к стенке (не создается разрежение между струей и стенкой) и струя отходит от стенки.

Струйный элемент имеет каналы питания 1, управления 2 и 3, выходные каналы 4 и 5. К каналу 1 от источника питания подводится воздух. Канал 4 сообщается с атмосферой, а канал 5 – с емкостью 6 измерительного элемента. Емкость 6 имеет в

нижней части капиллярную трубку 7. Измерительный элемент погружен в контролируемую жидкость. В канале управления 2 имеется дроссель 8, а в канале управления 3 – дроссель 9. Проходное сечение дросселя 8 несколько больше проходного сечения дросселя 9. Емкость 6 соединена цепью обратной связи 10 через дроссель 9 с каналом управления 3.

При подаче питания на вход измерительного устройства струя, вытекающая из канала 1, первоначально примыкает к стенке 11 элемента (это связано с указанным ранее различием в площадях проходного сечения дросселей 8 и 9) и поток газа направляется в канал 5, откуда поступает в емкость 6. В процессе поступления газа давление в емкости 6 нарастает. Соответственно увеличивается и давление в каналах 10 и 3. Нагнетание



**Рис. 3.11** Принципиальная пневматическая схема аэрогидродинамического устройства для измерения вязкости

газа заканчивается, когда давление в канале 3 достигнет значения, при котором происходит отрыв струи от стенки 11. Поток газа прилипает при этом к стенке 12 струйного элемента, и, следуя по каналу 4, выходит в атмосферу. Начинается разгрузка емкости. Газ вытекает из емкости 6 по каналу 5 и, увлекаемый струей, протекающей из канала 1 в канал 4, выбрасывается в атмосферу. В это время происходит заполнение емкости 6 через капиллярную трубку 7 контролируемой жидкостью. В конце процесса разгрузки вследствие эжекторного действия потока, протекающего по каналу 4, в канале 5 создается разрежение, которое передается в каналы 10 и 3. Под действием создавшейся разности давлений в каналах 2 и 3 основная струя питания снова отрывается от стенки 12 и примыкает к стенке 11. Вновь начинается заполнение емкости измерительного элемента газом и вытеснение жидкости из емкости через капиллярную трубку истечения 7.

Далее процесс работы измерительного устройства повторяется аналогично рассмотренному выше. Дроссели 8 и 9 регулируемые. Меняя площадь проходного сечения этих дросселей, дросселируя канал сообщения с атмосферой 4 и изменяя давление  $P_{пит}$  на входе в канал питания 1, можно менять нужным образом расход газа, давление в процессе подачи газа в емкость и его отбора, частоту периодического процесса.

При постоянстве всех конструктивных параметров и давления питания  $P_{пит}$  частота периодического процесса будет определяться вязкостью контролируемой жидкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик, Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.В. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.
2. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей : справ. пособие : пер. с англ. / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд; под ред. Б.И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1982. – 592 с.
3. Теплофизические свойства жидкостей / отв. ред. д-р техн. наук З.И. Геллер. – М. : Недра, 1973. – 546 с.
4. Технические условия на нефтепродукты. – М. : Недра, 1969. – 380 с.
5. Гольдберг, Д.О. Смазочные масла из нефтей восточных месторождений / Д.О. Гольдберг, С.З. Крейн. – М. : Химия, 1972. – 285 с.
6. Степанов, Л.П. Измерение вязкости жидкостей / Л.П. Степанов. – М., 1975. – 70 с.
7. ГОСТ 4.24–71. Система показателей качества продукции. Нефтепродукты. Масла смазочные. – М. : Изд-во стандартов, 1971. – 6 с.
8. ГОСТ 4.25–71. Система показателей качества продукции. Нефтепродукты. Топлива жидкие. – М. : Изд-во стандартов, 1971. – 6 с.
9. Четкин, А.В. Высокотемпературные теплоносители / А.В. Четкин. – М. : Энергия, 1971. – 496 с.
10. Викторов, М.М. Методы вычисления физико-химических свойств жидкостей / М.М. Викторов. – Л. : Химия, 1976. – 112 с.
11. Сычев, В.В. Построение аппроксимаций для научно-технических расчетов / В.В. Сычев, Г.А. Спиридонов, Ю.М. Касьянов // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 45. – № 5. – С. 855 – 859.
12. Сарданашвили, А.Г. Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа / А.Г. Сарданашвили, А.И. Львова. – М. : Химия, 1980. – 254 с.
13. Мищенко, С.В. Расчет теплофизических свойств веществ / С.В. Мищенко, И.А. Черепенников, С.Н. Кузьмин. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1991. – 208 с.
14. Об использовании средств пневмоавтоматики при измерении вязкости жидких нефтепродуктов / Л.А. Залманзон, А.А. Кузнецова, М.С. Альховский, Н.С. Харас // Всесоюз. совещ. по пневмоавтоматике : тез. докл. 12. – М. : Изд-во ИПУ, 1973. – Ч. 1. – С. 43–44.
15. Барр, Г. Вискозиметрия / Г. Барр. – М. : ГОНТИ, 1938. – 820 с.
16. Волярович, М.П. Исследование реологических свойств дисперсных систем / М.П. Волярович // Коллоидный журнал. – 1954. – Т. XVI. – № 3. – С. 227 – 240.
17. Волярович, М.П. Структурно-реологические свойства дисперсных и высокомолекулярных систем / М.П. Волярович, И.И. Лиштван, В.М. Наумович // Инженерно-физический журнал. – 1962. – Т. 5. – № 2. – С. 122 – 132.
18. Гализдра, В.И. Бесконтактный аэрогидродинамический метод измерения вязкости жидких веществ / В.И. Гализдра, М.М. Мордасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, – 2000. – Т. 66, № 6. – С. 37 – 39.
19. Брюханов, В.А. Методы повышения точности измерений в промышленности / В.А. Брюханов. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 108 с.
20. Кузнецова, Н.Н. Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления / Н.Н. Кузнецова // Приборы и системы управления. – 1987. – № 5. – С. 47 – 48.
21. Кораблев, И.В. Расчет и проектирование автоматических средств контроля технологических процессов / И.В. Кораблев. – М. : МИХМ, 1985. – 85 с.
22. Лаптев, В.И. Барботажно-пьезометрические методы контроля физико-химических свойств жидкостей / В.И. Лаптев. – М. : Энергоиздат, 1984. – 79 с.
23. Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики : каталог. – М. : ЦНИИТЭПриборостроения, 1972. – 28 с.
24. Берендс, Т.К. Элементное построение приборов и систем пневмоавтоматики / Т.К. Берендс, А.А. Тагаевская, А.А. Таль // Пневмо- и гидроавтоматика / Под ред. М.А. Айзермана. – М. : Наука, 1964. – С. 5 – 20.
25. Элементный принцип в пневмоавтоматике / Т.К. Берендс, Т.К. Ефремова, А.А. Тагаевская, А.А. Таль // Приборостроение. – 1963. – № 11. – С. 3 – 8.
26. Элементы и схемы дискретной техники в системах автоматического контроля и управления. – М. : ОНТИПрибор, 1964. – Вып. IV. – 92 с.; Вып. V. – 70 с.; Вып. VI. – 52 с.
27. Залманзон, Л.А. Струйные методы измерения и построения датчиков : обзор / Л.А. Залманзон // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 9. – С. 75 – 94.
28. Залманзон, Л.А. Пневмоника / Л.А. Залманзон. – М. : Наука, 1964. – 64 с.
29. Залманзон, Л.А. Новые возможности пневмоавтоматики / Л.А. Залманзон, А.А. Таль // Вестник АН СССР. – 1963. – № 10. – С. 58 – 62.
30. Залманзон, Л.А. Теория элементов пневмоники / Л.А. Залманзон. – М. : Наука, 1969. – 508 с.
31. Залманзон, Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем / Л.А. Залманзон. – М. : Наука, 1973. – 464 с.

32. Колосов, С.П. Элементы автоматики / С.П. Колосов, И.В. Калмыков, В.И. Нефедов. – М. : Машиностроение, 1970. – 632 с.
33. Обухов, В.И. Принципы формирования элементов автоматики / В.И. Обухов. – Минск : Наука и техника, 1970. – 288 с.
34. Харкевич, А.А. Теория преобразователей / А.А. Харкевич. – М. : Госэнергоиздат, 1948. – 265 с.
35. Сотсков, Б.С. Научные основы построения технических средств автоматики / Б.С. Сотсков. – М. : Изд-во АН БССР, 1957. – 256 с.
36. Обухов, В.И. Использование физических эффектов, явлений, свойств при проектировании элементов автоматики / В.И. Обухов, В.П. Мельников. – Минск : Изд-во АН БССР, 1966. – № 4. – С. 52 – 60. – (Сер. физ.-мат. наук).
37. Плесконос, А.К. Контроль параметров жидкости в резервуаре / А.К. Плесконос, В.В. Колпаков, И.Г. Филиппенко. – Киев, 1987. – 17 с. – Деп. в Укр. НИИТИ 14.07.87, № 2032-УК87.
38. Головченко, А.Н. Дроссельные пневматические преобразователи для измерения температуры / А.Н. Головченко, М.В. Кулаков, Е.Ф. Шка-  
тов. – М. : Энергия, 1974. – 95 с.
39. Куратцев, Л.Е. Приборы размерного контроля на элементах пневмоавтоматики / Л.Е. Куратцев, И.М. Цырульников. – М. : Машиностроение, 1977. – 134 с.
40. Ибрагимов, И.А. Элементы и системы пневмоавтоматики / И.А. Ибрагимов, Н.Г. Фарзанае, Л.В. Илясов. – М. : Вышш. шк., 1985. – 544 с.
41. Эйгенброт, В.М. Пневматические устройства телемеханики : учеб. пособие / В.М. Эйгенброт. – М. : Энергия, 1975. – 88 с.
42. Прусенко, В.С. К вопросу определения оптимальных диаметров линии связи в пневматических САР / В.С. Прусенко // Приборы и системы управления. – 1969. – № 12. – С. 38 – 40.
43. Люстерник, В.Е. Современные методы измерения вязкости газов и жидкостей / В.Е. Люстерник // Состояние исследований теплофизических свойств жидкостей и нефтепродуктов: вязкость газов и жидкостей : тез. докл. Всесоюз. конф. 9 – 13 сентября 1975 г. – Грозный : Грозн. нефт. ин-т, 1975. – С. 12 – 14.
44. Ландау, Л.Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / Л.Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1965. – 384 с.
45. Залманзон, Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления / Л.А. Залманзон. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 247 с.
46. Седов, Л.И. Методы подобия и размерностей в механике / Л.И. Седов. – 3-е изд., перераб и доп. – М. : Наука, 1977. – 440 с.
47. Гатчек, Э. Вязкость жидкостей : пер. с англ. / Э. Гатчек. – 2 изд. – М.–Л. : ГОНТИ, 1934. – 285 с.
48. Мордасов, М.М. Многофункциональный камерный первичный преобразователь в способах и устройствах для измерения теплофизических свойств / М.М. Мордасов // Новейшие исследования в области теплофизических свойств: тез. докл. IX Всесоюз. теплофиз. шк. – Тамбов, 1988. – С. 127–128.
49. Мордасов, М.М. Измерение состава и свойств жидких сред в процессе их производства и хранения. Сообщение 1. Универсальный измерительный элемент пневматических приборов для анализа физико-механических свойств жидкостей / М.М. Мордасов. – Тамбов : ТВВАИУ, 1985. – 12 с. – Деп. в ЦИВТИ МО СССР, № 9680 от 24.03.1985.
50. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.
51. Агаев, Н.А. Автоматическое измерение времени истечения в вискозиметрии / Н.А. Агаев, А.Д. Юсибова, Л.С. Харченко // Измерительная техника. – 1971. – № 7. – С. 74.
52. Пат. 295283 СССР. Устройство для измерения вязкости жидкостей в сосудах / Г. Пиатковски, К. Штенгель, И. Канес. – Оpubл. 1971, Бюл. № 7.
53. Хентов, В.Я. Автоматический капиллярный вискозиметр с подвешенным уровнем / В.Я. Хентов, Е.Г. Семин, Г.М. Рябинкова // Измерительная техника. – 1971. – № 1. – С. 102.
54. А. с. 493703 СССР. Способ определения времени истечения жидкости через капилляр / Мордасов М.М., Астафьев В.И. – Оpubл. 1975, Бюл. № 44.
55. Мордасов, М.М. Автоматический капиллярный вискозиметр / М.М. Мордасов // Автоматизация и КИП. – 1979. – № 12. – С. 9 – 12.
56. Мордасов, М.М. Пневматическое устройство для измерения вязкости / М.М. Мордасов, В.М. Тютюнник // Журнал физической химии. – 1979. – Т. 53, № 3. – С. 773.
57. Определение вязкости акриловых смол непосредственно в реакционном аппарате / М.М. Мордасов, В.М. Тютюнник, В.Д. Рязанцев, В.Л. Бараев // Заводская лаборатория. – 1980. – № 6. – С. 531.
58. А. с. 759912 СССР. Устройство для измерения вязкости жидкости / Мордасов М.М., Бодров В.И., Зубрев А.Г. – Оpubл. 1980, Бюл. № 32.
59. Мордасов, М.М. Автоматическое измерение вязкости жидких сред в реакционных аппаратах / М.М. Мордасов // Автоматизация и КИП. – М. : ЦНИИТЭИнефтехим, 1978. – № 12. – С. 8 – 12.



60. А. с. 600419 СССР, МКИ G 01N 13/08. Устройство для определения вязкости жидкости / Мордасов М.М., Тютюнник В.М., Рязанцев В.Д., Баранов В.Л. – № 2332666/18-25; заявл. 09.03.76; опубл. 30.03.78., Бюл. № 12.
61. Мордасов, М.М. Автоматическое измерение времени истечения в вискозиметрии / М.М. Мордасов, В.М. Тютюнник // Автоматизация и КИП. – М. : ЦНИИТЭИнефтехим, 1982. – № 6. – С. 16.
62. А. с. 1075120 СССР, МКИ G 01 N 11/08. Устройство для измерения вязкости жидкостей / Бодров В.И., Мордасов М.М., Трофимов А.В. – № 3535315/18-25; заявл. 10.01.83; опубл. 23.02.84., Бюл. № 7.
63. А. с. 1073624 СССР, МКИ G 01 N 11/08. Устройство для измерения вязкости жидкостей / Бодров В.И., Мордасов М.М., Трофимов А.В. – № 35335046 / 18 – 25; заявл. 10.01.83; опубл. 15.02.84., Бюл. № 6.
64. А. с. 1157404 СССР, МКИ G 01 N 11/08. Устройство для измерения вязкости жидкостей / Бодров В.И., Кочетов И.В., Лазарева Т.Я., Мордасов М.М., Трофимов А.В., Шамкин В.Н. – № 3727044/24-25; заявл. 16.04.84; опубл. 23.05.85, Бюл. № 19..
65. А. с. 1748489 СССР, МКИ G 01 N 11/08, 11/00. Устройство для измерения вязкости жидкости / Мордасов М.М., Коваленко С.В., Гализдра В.И. – № 4826055/25; заявл. 15.05.90.
66. Мордасов, М.М. Повышение точности автоматических капиллярных вискозиметров погружного типа / М.М. Мордасов. – Тамбов : ТВВАИУ, 1986. – 29 с. – Деп. в ЦИВТИ МО СССР, № 10023 от 15.01.1986.
67. А. с. 1700445 СССР, МКИ G 01 N 11/08. Устройство для измерения вязкости / Мордасов М.М., Коваленко С.В., Гализдра В.И. – № 4655819/25; заявл. 27.02.89; опубл. 23.12.91., Бюл. № 47.
68. А. с. 1679279 СССР, МКИ G 01 N 11/06. Устройство для измерения физико-химических параметров жидких сред / Дмитриев Д.А., Мордасов М.М. – № 4686367/25; заявл. 28.03.89; опубл. 23.09.91, Бюл. № 35.
69. Мордасов, М.М. Повышение точности погружных капиллярных вискозиметров с камерным первичным преобразователем / М.М. Мордасов, С.В. Коваленко // Сборник научно-методических материалов. – Тамбов : ТВВАИУ, 1990. – Вып. 2. – С. 43 – 52.
70. Богомолов, А.Г. Гидравлика / А.Г. Богомолов, К.Л. Михайлов. – 2-е изд, перераб., доп. – М. : Стройиздат, 1972. – 648 с.
71. А. с. 857785 СССР, МКИ G 01 N 11/08. Устройство для определения вязкости жидкости / Мордасов М.М., Трофимов А.В. – № 2840457/18-25; заявл. 16.11.79; опубл. 23.08.81, Бюл. № 31.
72. Булгаков, Б.Б. Пневматическое устройство для измерения вязкости / Б.Б. Булгаков, Л.И. Пищенко, М.В. Ликиннок // Пневмоавтоматика : тез. докл. 15 Всесоюз. совещ. – Львов : Изд-во Института проблем управления АН СССР, 1985. – Ч. 2. – С. 9 – 11.
73. Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г.И. Фукс. – М. : ГНТИ, 1951. – 348 с.
74. Мордасов, М.М. Автоматический контроль вязкости жидких сред в закрытых аппаратах / М.М. Мордасов // Заводская лаборатория (диагностика материалов). – 1994. – Т. 60, № 1. – С. 23 – 35.
75. Реометрия пищевого сырья и продуктов : справочник / Под. ред. Ю.А. Мачихина. – М. : Агропромиздат, 1990. – 271 с.
76. Нарушева, Н.В. Технохимический контроль кондитерского производства / Н.В. Нарушева, И.С. Лурье. – М. : Агропромиздат, 1990. – 154 с.
77. Технохимический контроль сахарного производства / Под. ред. И.Ф. Бугаенко. – М. : Агропромиздат, 1989. – 216 с.
78. Технохимический и микробиологический контроль в кондитерском производстве : справочник / И.С. Лурье, Л.Е. Скокан, А.П. Цитович. – М. : Колос, 2003. – 416 с.
79. Приборы технологического контроля в молочной промышленности : справочник / А.П. Брусиловский, А.Я. Вайнберг. – М. : Агропромиздат, 1990. – 288 с.
80. Волчек, И.С. Автоматизация производств поликонденсационных смол / И.С. Волчек, Ю.М. Лужков. – М. : Химия, 1976. – 231 с.
81. Латекс в технике / под. ред. И.В. Гармонова, А.В. Лебедева. – Л. : Ленинградское отделение Госхимиздата, 1962. – 896 с.
82. Басов, Н.И. Контроль качества полимерных материалов / Н.И. Басов, В.А. Любартович, С.А. Любартович; под. ред. В. А. Брагинского. – Л. : Химия, 1990. – 112 с.
83. Теплофизические и физико-химические характеристики продуктов микробиологического синтеза : справочник / А.М. Карпов, А.В. Саруханов. – М. : Агропромиздат, 1987. – 224 с.
84. Казенмова, Е.П. Общая технология стекла и стеклянных изделий / Е.П. Казенмова. – М. : Стройиздат, 1989. – 144 с.
85. А. с. № 705309 СССР, МКИ G 01 N 11/08. Устройство для измерения вязкости жидкостей / Бургвиц А.Г., Ефремов К.Д., Лагода В.И.
86. Земельман, М.Л. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств / М.Л. Земельман. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 197 с.

87. Фудим, Е.В. Пневматическая вычислительная техника / Е.В. Фудим. – М. : Наука, 1973. – 360 с.
88. Ибрагимов, И.А. Элементы и системы пневмоавтоматики / И.А. Ибрагимов, Н.Г. Фарзана, Л.В. Илясов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1985. – 544 с.
89. А. с. 493704 СССР, G 01 N 11/00. Устройство для непрерывного измерения вязкости / Мордасов М.М., Шаталов Ю.С. – Оpubл. 30.11.75, Бюл. № 44.
90. Пробоотбор в системах контроля показателей качества продукции : учебное пособие / С.В. Мищенко, М.М. Мордасов, А.В. Трофимов, А.А. Чуриков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 104 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Введение. ВЯЗКОСТЬ – ПАРАМЕТР КОНТРОЛЯ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ	5
1. Общие сведения о вязкости жидкости	5
2. Зависимость вязкости жидкостей от температуры и давления	8
3. Значимость вязкости для контроля жидких веществ и проведения технологических процессов	10
4. Пневматические методы измерения вязкости и их классификация	15
5. Развитие пневмогидравлических методов и средств контроля веществ	21
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАПИЛЛЯРНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ	25
1.1. Математические описания течения вязкой жидкости	25
1.2. Математическое описание обобщенного пневмогидравлического измерительного элемента	35
2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ ПРИ ПОДАЧЕ ПОСТОЯННОГО ДАВЛЕНИЯ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ	40
2.1. Пневматические методы измерения времени истечения в вискозиметрии	40
2.2. Классификация пневматических капиллярных вискозиметров и общий подход к их разработке	43
2.3. Устройства для контроля вязкости с аэродинамической индикацией момента окончания истечения жидкости	49
2.4. Контроль вязкости по времени изменения выталкивающей силы, действующей на измерительный элемент	58
2.5. Компенсация и коррекция влияния неконтролируемых величин на результат измерений	65
2.6. Устройства для измерения вязкости с автоматической чисткой капилляра	79
3. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЛИЧЕСТВА ГАЗА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ	92
3.1. Метод измерения вязкости по величине установившегося давления	92
3.2. Устройство для автоматического измерения вязкости в технологических аппаратах по величине установившегося давления при непрерывном расходе газа на входе измерительного преобразователя	94
3.3. Автоматическое устройство для измерения вязкости с пульсирующей подачей газа на вход измерительного преобразователя	101
3.4. Устройство для измерения вязкости со струйной подачей газа в измерительный преобразователь	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113