

## Вихревой регулятор давления газа

© О.В. Белова, А.А. Стародубцев, А.В. Чернышев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В статье раскрывается актуальность и области применения вихревых регуляторов. На основе обзора литературы и патентного обзора рассмотрено состояние вопроса на сегодняшний день по использованию и разработке вихревых регуляторов, приводятся схемы вихревых регуляторов, оценочный расчет параметров вихревого регулятора при заданных скоростях питающего и управляющего потоков и с заданными размерами вихревой камеры. Рассчитана математическая модель расчета вихревого регулятора, описывающая процессы течения рабочих сред, на базе которой в дальнейшем будет разработан метод расчета по распределенным параметрам, и проведен численный расчет вихревой камеры с помощью современных CFD-пакетов.*

**Ключевые слова:** вихревой регулятор, управляющая струя, расход газа.

**Введение.** Регуляторы параметров газа — устройства, обеспечивающие с заданной точностью поддержание определенных параметров рабочего тела на постоянном уровне либо изменяющие эти параметры по заданной программе.

Регуляторы классифицируются следующим образом:

- прямого и непрямого действия;
- «до себя» или «после себя»;
- газовые и жидкостные регуляторы в зависимости от рабочей среды, проходящей через дроссельный элемент регулятора.

Регуляторы применяются чрезвычайно широко: системы трубопроводов для транспортировки природного газа от места его добычи до потребителя; системы с пневматическими или гидравлическими устройствами для регулирования процессов, происходящих по определенному циклу или по заданной программе; системы подачи рабочих жидкостей в объектах гражданского и военного назначения (ракетная и авиационная техника, беспилотные летательные аппараты, автотранспорт); системы автоматического регулирования и др.

Большинство регуляторов работает в неблагоприятных условиях: с высокотемпературными средами; запыленными газами или смесями; с химически агрессивными средами и т. д.

Это такие области применения, как:

- металлургическая промышленность, где газ имеет высокую температуру и содержит примеси тяжелых и раскаленных металлов;
- химическая и биологическая промышленность: в этой отрасли газ может содержать различные элементы, как агрессивные, так и вступающие в реакцию друг с другом или с элементами системы;
- высокофорсированные топочные и нагревательные установки;
- циклонные реакторы;
- сепарирующие системы.

Для таких случаев используют регуляторы, основные элементы которых выполнены из специальных материалов; дополнительные системы очистки или фильтрации рабочей среды; ловушки. Все это делает конструкцию менее надежной, и при этом значительно повышает ее себестоимость и затраты на установку и эксплуатацию.

В 60...70-х годах прошлого столетия появились регуляторы, принцип действия которых основывался на турбулентном (спирале-видном) течении потока газа в вихревой камере. На струю входного газа воздействует управляющая струя, которая закручивает поток для образования вихревого течения. Основным преимуществом данного устройства является отсутствие подвижных частей, что значительно упрощает конструкцию и дает возможность использовать этот регулятор там, где это проблематично для других видов регуляторов.

**Схема вихревого регулятора.** На рис. 1 представлена схема одного из вариантов исполнения вихревого регулятора [1]. Струя питания 2 поступает в вихревую камеру 3 и, заполняя ее, проходит к центральному выходному каналу 4. При подаче управляющей струи в канал 1, направленный по касательной, возникает ее взаимодействие со струей питания. Вследствие эффекта Коанда [2] струя пита-

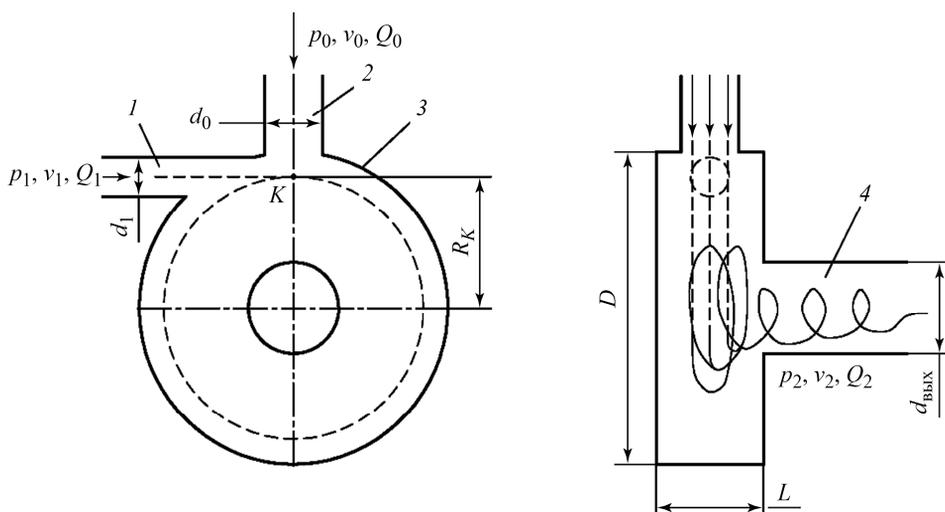


Рис. 1. Схема вихревого регулятора

ния отклоняется и притягивается к цилиндрической стенке вихревой камеры, в результате чего в камере возникает вихревое движение потока газа.

Существуют и другие схемы вихревых регуляторов, отличающиеся, в основном, конструкцией подвода струи питания в рабочую камеру и выходного канала. Основоположник создания и внедрения вихревых регуляторов в СССР — Л.А. Залманзон. Первые публикации и патенты по данной теме появились в конце 60...70-х годов XX в. Параллельно в этой области работали также специалисты в Германии, США и Великобритании [3–5]. Примеры вихревых регуляторов приведены на рис. 2 [2] и 3 [4, 5].

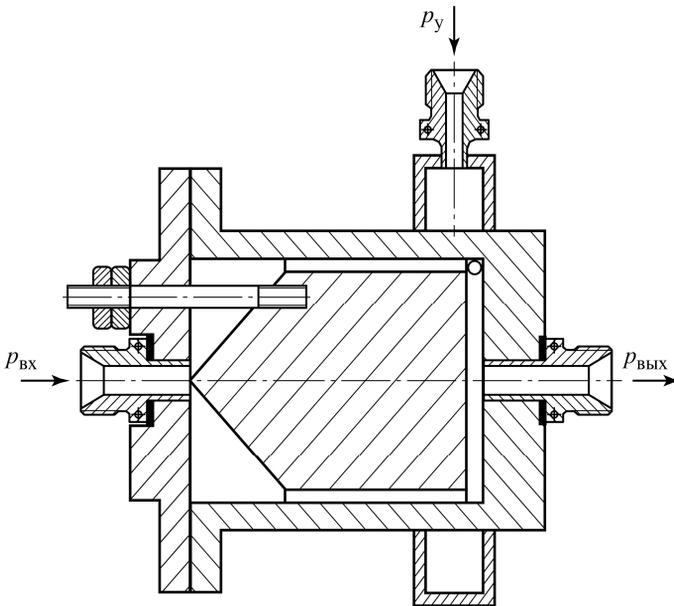


Рис. 2. Вихревой регулятор с центральным телом

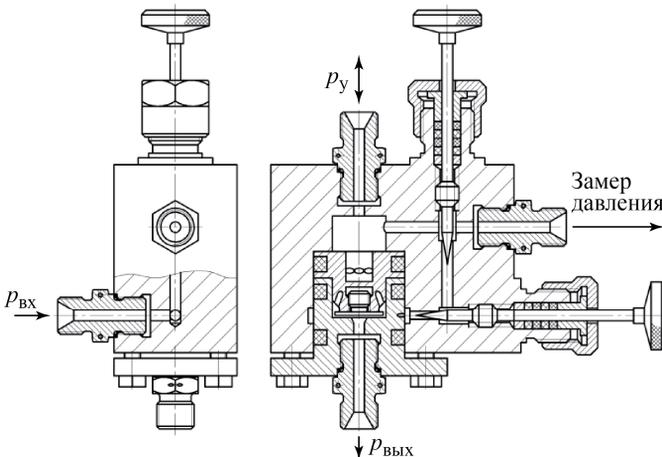


Рис. 3. Настраиваемый вихревой регулятор давления газа

Вихревой регулятор имеет ряд недостатков:

- не может использоваться как запорный элемент;
- скорость срабатывания значительно меньше, чем у аналогичных, имеющих более сложные конструкции;
- присутствие шума из-за турбулизации потока (вихревого течения).

В то же время вихревой регулятор обладает неоспоримыми преимуществами по сравнению с другими видами регуляторов:

- простота конструкции (отсутствие подвижных элементов);
- долговечность;
- невосприимчивость к воздействию электромагнитных полей;
- невосприимчивость к радиационному воздействию;
- возможность работы с различными газами и их смесями;
- низкая стоимость изготовления (производства);
- низкие эксплуатационные затраты.

В связи с вышеперечисленным разработка современных устройств для новейших технических систем является актуальной.

**Методика оценочного расчета характеристик вихревых регуляторов по сосредоточенным параметрам.** Методы расчета вихревых регуляторов изложены в литературе [1, 6–11], причем единого понимания в теории процессов, происходящих в данных устройствах, нет до сих пор. Основные зависимости заложил в своих работах Л.А. Залманзон [9].

Из постоянства момента количества движения следует (см. рис. 1):

$$m_1 v_1 = m_K v_K.$$

С учетом того, что  $m_1 = \rho Q_1$  и  $m_K = \rho(Q_0 + Q_1)$ , получаем:

$$v_K = \frac{v_1 Q_1}{Q_0 + Q_1}.$$

Из уравнения Бернулли следует:

$$p_2 = p_K + \left( \frac{\rho(v_K^2 - v_2^2)}{2} \right),$$

$$p_K = p_1 - \left( \frac{\rho}{2} \right) \left( \frac{Q_1}{\varepsilon_1 f_1} \right)^2, \quad (1)$$

где  $f_1$  — площадь сечения канала управления;  $\varepsilon_1$  — коэффициент расхода.

Падение давления в вихревой камере  $\delta p = p_K - p_2$  из формулы (1):

$$\delta p = \frac{\rho(v_K^2 - v_2^2)}{2},$$

или

$$\delta p = \frac{\rho}{2} \left( \left( \frac{r_K}{r_2} \right)^2 - 1 \right) \left( \frac{Q_1}{Q_0 + Q_1} \right)^2 v_1^2.$$

Коэффициент усиления по давлению, согласно Глэтли [6], равен отношению величины  $\delta p$  к напору в канале управления  $\frac{\rho v_1^2}{2}$ , т. е.

$$\eta_p = \left[ \left( \frac{r_K}{r_2} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{Q_1}{Q_0 + Q_1} \right)^2.$$

Коэффициент усиления вихревого элемента по расходу

$$\eta_Q = \frac{Q_0 + Q_1}{Q_1}.$$

Мощность потока определяется как произведение объемного расхода на разность давлений, т.е.  $N_1 = Q_1 \frac{\rho v_1^2}{2}$  и  $N_2 = (Q_1 + Q_0) \rho p$ . Тогда коэффициент усиления по мощности

$$\eta_N = \left[ \left( \frac{r_K}{r_2} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{Q_1}{Q_0 + Q_1} \right).$$

Однако для разработки новых конструкций вихревых регуляторов с применением современных программных пакетов и на базе имеющейся компьютерной техники необходимо создать описания процессов, происходящих внутри вихревой камеры.

**Математическая модель для проведения расчетов по распределенным параметрам.** В общем случае система состоит из уравнений, описывающих нестационарное турбулентное течение сжимаемой «ньютоновской» вязкой жидкости [12, 13]:

— уравнение неразрывности:

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

где  $p$  — давление;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность;  $\vec{u}$  — вектор скорости;

— закон сохранения количества движения:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i,$$

где индекс  $i$  относится к входящему потоку; индекс  $j$  — к выходящему потоку;  $u_i$  — проекция вектора скорости  $\vec{u}$  на ось  $x_i$ ;  $S_i$  — источник объемных и поверхностных сил;  $\tau_{ij}$  — тензор напряжений для вязкой жидкости:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left( \xi - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij},$$

где  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\delta_{ij}$  — оператор Кронекера;

— закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho H u_j - k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_i} - \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + S_h,$$

где  $S_h$  — объемный источник тепла;  $H$  — полная удельная энтальпия жидкости, которая выражается суммой удельной энтальпии и кинетической энергии единицы массы жидкости:

$$H = h + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2},$$

где  $h = c_p T$  — удельная энтальпия, при условии, что удельная теплоемкость жидкости постоянна;  $u, v, w$  — проекции вектора скорости на направления  $x, y, z$  соответственно.

Система уравнений замыкается граничными условиями: на входе в устройство задаются значения давления  $p_0, p_1$ , скорости потоков  $v_0, v_1$ ; температур потоков  $T_0, T_1$ ; на выходе — давления  $p_2$ .

В дальнейшем система должна дополниться описанием характера течения в виде используемых моделей турбулентности и уравнением состояния. Полученная математическая модель ляжет в основу метода расчета вихревых регуляторов.

**Заключение.** Обзор литературы в этой области показал, что полного понимания процессов, происходящих в камере вихревого регулятора, нет. Как именно происходит вихреобразование в камере, зависит от слишком большого количества факторов: физических свойств рабочих тел, кинематических и динамических характеристик потока в выходном и входном сечениях регулятора, геометрических характеристик камеры и каналов. В связи с отсутствием вычислительных возможностей в 60...70-е годы прошлого столетия расчетов по распределенным пара-

метрам не проводилось. С разработкой новейших расчетных пакетов, компьютерной техники с большой вычислительной мощностью появилась возможность в реализации расчета на основе математических моделей турбулентного течения внутри камеры, создать методы расчета вихревых регуляторов и создать модельный ряд вихревых регуляторов для промышленного использования.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бугаенко В.Ф. *Пневмоавтоматика ракетно-космических систем*. Будник В.С., ред. Москва, Машиностроение, 1979, 168 с.
- [2] Смирнов Г.В. *Рожденные вихрем*. Москва, Знание, 1982, 192 с.
- [3] Mayer E.A. Adjustable Vortex pressure regulator. *Pap. ASME*, 1970, N Flcs-9, 8 p.
- [4] *Method and vortex pressure regulator apparatus*. Patent 3,628,549 US. Mayer E.A., Int. Cl. Application from 20.01.1970.
- [5] Erdelyi J. Further investigation of the Ranque phenomenon. *Acta technical Academiae Scientiarum Hungaricae*, T. 46, Fasc. 3–4, 1964.
- [6] Glaettly H.H. Digital fluid logic elements. *Advances in computers*, vol. 4, Edit. by: A. Franz, M. Rubinoff., 1963, 312 p.
- [7] Mayer E.A., Maker P. Control characteristics of vortex valves. *Proceedings of the Second Fluid Amplification Symposium*, vol. II, 1964.
- [8] Sarpkaya T. Characteristics of counter-vortex oscillator. *Proceedings of the Second Fluid Amplification Symposium*, vol. II, 1964.
- [9] Залманзон Л.А. *Теория элементов пневмоники*. Москва—Ленинград, Изд-во Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969, 508 с.
- [10] Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. *Элементы струйной автоматики*. — Москва, Машиностроение, 1973, с. 289–314.
- [11] Дейч М.Е. *Техническая газодинамика*. Москва—Ленинград, Госэнергоиздат, 1961, 680 с.
- [12] Черный Г.Г. *Газовая динамика*. Москва, Наука, 1988, 424 с.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Вихревой регулятор давления газа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/760.html>

**Белова Ольга Владимировна** родилась в 1971 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области компьютерного моделирования инженерных систем. e-mail: [ovbelova@yandex.ru](mailto:ovbelova@yandex.ru)

**Стародубцев Алексей Александрович** родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. по специальности «Вакуумная и компрессорная техника». Аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Чернышев Андрей Владимирович** родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и электропневматического оборудования различного назначения. e-mail: [av-chernyshev@yandex.ru](mailto:av-chernyshev@yandex.ru)