

УДК 697

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИХ ОБЪЕКТНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Соколов В.И.

## MODELING OF GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE VENTILATION SYSTEMS BASED ON THEIR OBJECT-ORIENTED DECOMPOSITION

Sokolov V.I.

*Представлена методика расчета газодинамических характеристик промышленных вентиляционных систем на основе их объектной декомпозиции. В системе выделены типовые расчетные элементы, структуры и связи, на основании чего построена обобщенная математическая модель. Рассмотрены исходные данные для моделирования характеристик системы.*

**Ключевые слова:** вентиляционная система, декомпозиция, давление, расход, расчетный элемент, конструктивный узел, замкнутый контур.

### Постановка проблемы.

Составной частью любого промышленного предприятия являются такие инженерно-технические сооружения, как вентиляционные системы [1–3], обеспечивающие требуемые санитарно-технические нормы в производственных помещениях, безопасность труда и соблюдение технологических процессов. Вентиляция и кондиционирование воздуха играют важнейшую роль на ряде предприятий машиностроительной, химической, текстильной промышленности, в шахтах, где без них невозможно ведение многих технологических процессов.

Системы вентиляции и кондиционирования современных промышленных предприятий и объектов, атомных станций представляют собой сложные инженерные сооружения и требуют на свое создание больших материальных затрат. Кроме того, доля эксплуатационных затрат на их функционирование может составлять 50–60% общих расходов на эксплуатацию здания. Поэтому важно не только обеспечить нормальные санитарно-технические нормы в помещениях, но и добиваться рационального и экономичного инженерного решения при устройстве системы вентиляции еще на стадии проектирования. Решение этой проблемы может дать существенный положительный эффект в техническом, экономическом и социальном аспекте

– обеспечить работу агрегатов в расчетных режимах, уменьшить стоимость вентиляционной системы, повысить безопасность труда.

### Анализ последних исследований и публикаций.

Рост требований к эффективности вентиляционных систем при современной тенденции сокращения времени на разработку проектируемых объектов предполагает пересмотр методов подхода к их расчету [1, 4–6]. Проблемы подготовки данных для проектирования, доводки и наладки готовых объектов, реконструкции существующих систем, как правило, решаются на основе многовариантных расчетов и поиска наиболее оптимальных решений с использованием математических моделей. Экспериментальной проверке и доводке подвергается весьма ограниченное число вариантов, отобранных на основе компьютерного моделирования системы. Такой подход к проектированию позволяет быстрее и надежнее находить оптимальные решения и экономически является наиболее оправданным. Кроме того, исследования, проведенные на математической модели с учетом реальных характеристик элементов систем, дают возможность обоснованно подойти к вопросу проведения ремонтно-восстановительных и профилактических работ, анализировать возможные аварийные ситуации и т.д.

### Цель статьи.

Целью данной работы разработка методики расчета газодинамических характеристик промышленных вентиляционных систем на основе их объектной декомпозиции на типовые расчетные элементы, структуры и связи.

### Материалы и результаты исследования.

Для моделирования газодинамических характеристик произвольной вентиляционной

системы выполним ее объектную декомпозицию, т.е. расчленим систему на расчетные элементы. Под расчетным элементом системы подразумеваем одно из конструктивных устройств реальной системы. Понятие элемента системы является относительным, так как под ним может подразумеваться и совокупность нескольких простых устройств.

По конструктивным и технологическим принципам в каждой вентиляционной системе могут быть выделены следующие типовые расчетные элементы:

- источники напора или нагнетатели (вентиляторы, воздуходувки, дымососы, компрессоры и т.д.);
- участки воздухопроводов, по которым осуществляется движение газовой среды;
- запорно-регулирующие устройства (завдвижки, местные сопротивления и т.д.);
- технологические устройства, осуществляющие выброс или отбор рабочей среды из системы (например, канал выброса в атмосферу).

Моделью источника напора примем математическую зависимость между полным давлением  $p_v$ , развиваемым нагнетателем, и расходом  $Q$

$$p_v = f_1(Q). \tag{1}$$

Характеристики нагнетателей в зоне рабочих режимов достаточно точно описываются параболой, которую по результатам паспортных данных или стендовых испытаний будем аппроксимировать в виде трехчлена

$$p_v = a + bQ + cQ^2, \tag{2}$$

где  $a, b, c$  – постоянные для данного вентилятора коэффициенты.

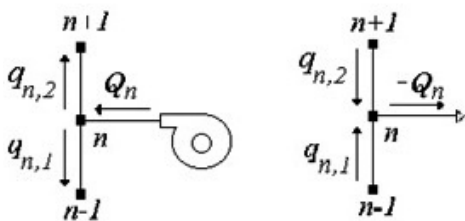


Рис. 1. Конструктивный узел

В качестве расчетной модели участка воздуховода вентиляционной системы используем зависимость потерь давления на трение и местных аэродинамических сопротивлений на рассматриваемом участке от расхода с учетом, в общем случае, режима течения рабочей среды, характеризуемого числом Рейнольдса  $Re$

$$\Delta p = f_2(Q, \Delta, \zeta, Re), \tag{3}$$

где  $\Delta$  – шероховатость внутренней поверхности воздуховода;  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления [4 – 6].

Характеристики запорно-регулирующих устройств и технологических устройств, осуществляющих выброс или отбор рабочей среды, представляем в виде

$$\Delta p_{py} = f_3(Q, R). \tag{4}$$

На основании анализа пространственной и технологической структуры в произвольной вентиляционной системе могут быть выделены конструктивные узлы и замкнутые контура. В качестве конструктивного узла примем места разветвления и слияния воздухопроводов (рис. 1). Для каждого из них должно соблюдаться уравнение неразрывности

$$Q_n + \sum_{p=1}^{MU} q_{n,p} = 0. \tag{5}$$

Здесь  $Q_n$  – расход рабочей среды, подаваемый нагнетателем или отбираемый (выбрасываемый) из  $n$ -го узла;  $q_{n,p}$  – расход, вытекающий или вытекающий из этого узла по участку воздуховода, подключенному к этому узлу;  $MU$  – число участков, подключенных к узлу. Можно условиться давать положительное значение расходу, если он направлен к узлу (см. рис. 1).

Связь полных давлений между двумя соседними узлами при наличии между ними, в общем случае, нагнетателей (см. рис. 2) можно представить в виде

$$p_n + \sum_{s=1}^{SV} (p_{v,n,n+1})_s = p_{n+1} + \Delta p_{cm,n,n+1} + \sum_{s=1}^{SP} (p_{py,n,n+1})_s + \sum_{s=1}^{SK} (\Delta p_{n,n+1})_s \tag{6}$$

где  $p_n, p_{n+1}$  – полные давления в узлах;  $\sum p_{v,n,n+1}$  – сумма характеристик источников напора, установленных между узлами;  $\Delta p_{cm,n,n+1}$  – потребный статический перепад давлений между узлами;  $\sum \Delta p_{py,n,n+1}$  – сумма перепадов давлений на запорно-регулирующих устройствах;  $\sum \Delta p_{n,n+1}$  – сумма потерь давления на участках воздухопроводов;  $SV$  – число источников напора между узлами;  $SP$  – число запорно-регулирующих устройств;  $SK$  – число участков воздухопроводов.

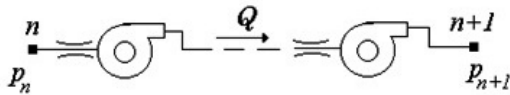


Рис. 2. Связь двух соседних узлов

Для каждого  $i$ -го замкнутого контура в системе (рис. 3)

$$\sum_{j=1}^{NK} \left[ \sum_{s=1}^{SK} (\Delta p)_{s,j,i} + \sum_{s=1}^{SP} (\Delta p_{py})_{s,j,i} - \sum_{s=1}^{SV} (p_v)_{s,j,i} \right] = 0 \quad (7)$$

Здесь  $NK$  – число линейных (междуузловых) участков, входящих в состав замкнутого контура;  $\sum (\Delta p)_{s,j,i}$ ,  $\sum (\Delta p_{py})_{s,j,i}$ ,  $\sum (p_v)_{s,j,i}$  – соответственно суммы потерь давлений на участках воздухопроводов, запорно-регулирующих устройствах, сумма полных давлений источников напора на  $j$ -ом линейном участке.

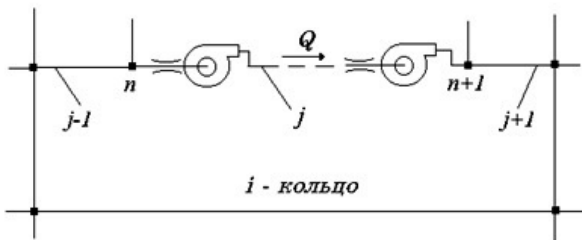


Рис. 3. Замкнутый контур (кольцо)

Выделим в произвольной вентиляционной системе согласно вышеизложенной методике типовые расчетные элементы, конструктивные узлы и замкнутые контура. В общем случае будем иметь  $KU$  узлов и  $KK$  замкнутых контуров. Тогда, для всей системы можно составить обобщенную математическую модель, в которую войдут:  $KU$  уравнений неразрывности (баланса расходов) в узловых точках; уравнений потерь давления в замкнутых контурах системы;  $KU-1$  уравнений связи полных давлений в узловых точках. С учетом принятых математических моделей типовых расчетных элементов уравнения (3 – 7) можно свести к системе из  $M$  линейных и  $N$  нелинейных уравнений

$$F_1(q) = \begin{cases} q_{1,1} + q_{1,2} + \dots + q_{1,k} + \dots + Q_1 = 0; \\ q_{2,1} + q_{2,2} + \dots + q_{2,k} + \dots + Q_2 = 0; \\ \dots \\ q_{n,1} + q_{n,2} + \dots + q_{n,k} + \dots + Q_n = 0; \\ \dots \\ q_{M,1} + q_{M,2} + \dots + q_{M,k} + \dots + Q_M = 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$F_2(q) = \begin{cases} B_{1,1}q_{1,1} + \dots + B_{1,j}q_{1,j} + \dots + C_{1,1}q_{1,1}^2 + \dots + C_{1,j}q_{1,j}^2 + \dots \\ \quad + R_{1,1}q_{1,1}^m + \dots + R_{1,j}q_{1,j}^m + \dots = A_1; \\ B_{2,1}q_{2,1} + \dots + B_{2,j}q_{2,j} + \dots + C_{2,1}q_{2,1}^2 + \dots + C_{2,j}q_{2,j}^2 + \dots \\ \quad + R_{2,1}q_{2,1}^m + \dots + R_{2,j}q_{2,j}^m + \dots = A_2; \\ \dots \\ B_{i,1}q_{i,1} + \dots + B_{i,j}q_{i,j} + \dots + C_{i,1}q_{i,1}^2 + \dots + C_{i,j}q_{i,j}^2 + \dots \\ \quad + R_{i,1}q_{i,1}^m + \dots + R_{i,j}q_{i,j}^m + \dots = A_i; \\ \dots \\ B_{N,1}q_{N,1} + \dots + B_{N,j}q_{N,j} + \dots + C_{N,1}q_{N,1}^2 + \dots + C_{N,j}q_{N,j}^2 + \dots \\ \quad + R_{N,1}q_{N,1}^m + \dots + R_{N,j}q_{N,j}^m + \dots = A_N; \end{cases} \quad (9)$$

где  $m$  – показатель степени в уравнении потерь давления для участка воздуховода (принимаемый при турбулентном режиме течения, который является рабочим для реальных систем, равным 2);  $A_i$ ,  $B_{i,j}$ ,  $C_{i,j}$  – постоянные коэффициенты, определяемые суммированием коэффициентов характеристик источников напора, а также добавлением статических давлений к коэффициенту  $A_i$  при записи связи между двумя соседними узлами;  $R_{i,j}$  – приведенные сопротивления.

Использование предложенной обобщенной математической модели для расчета параметров стационарного режима произвольной системы предполагает задание следующих исходных данных: схема расположения элементов в системе; геометрические характеристики конструктивных участков и коэффициенты установленных местных сопротивлений; аэродинамические характеристики запорно-регулирующих устройств; характеристики источников напора; высотные отметки и значения температуры в узловых точках; физические свойства рабочей среды; граничные условия (величины давлений и температуры в местах забора и выброса рабочей среды).

Выполнен анализ и обоснование численных методов расчета характеристик вентиляционных систем на обобщенной математической модели, в частности, показана эффективность методов Ньютона и Зайделя, метода итераций и половинного деления. Обобщенная математическая модель апробировалась при расчетах конкретных промышленных вентиляционных систем. При этом, достигались адекватные результаты [7–10], что позволяет рекомендовать данную методику в качестве инструмента для расчета сложных вентиляционных систем как при их проектировании, так и диагностики в процессе эксплуатации.

#### Выводы.

Таким образом, разработана методика расчета газодинамических характеристик промышленных вентиляционных систем на основе их объектной декомпозиции на типовые расчетные элементы, структуры и связи. Для моделирования характеристик предложена обобщенная математическая модель и рассмотрены основные исходные данные.

## Л и т е р а т у р а

1. Соколов В.И. Аэродинамика газовых потоков в каналах сложных вентиляционных систем. [Текст] – Луганск: ВУГУ, 1999. – 200 с.
2. Меклер В.Я. Вентиляция и кондиционирование воздуха на машиностроительных заводах [Текст]: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 335 с.
3. Мясников А.Ф., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е. Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. [Текст] – М.: Недра, 1983. – 270 с.
4. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. [Текст] – М.: Химия, 1980. – 284 с.
5. А.А. Коваленко Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, В.И. Соколов и др. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 278 с.
6. Коваленко А.А. Аэрогидромеханика. Ч. 7. Одномерные течения идеального газа: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, Соколов В.И. и др. – Луганск: ВНУ, 2001. – 48 с.
7. Андрийчук Н.Д. Пути совершенствования систем теплоснабжения / Н.Д. Андрийчук, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. – 244 с.
8. Недопекин Ф.В. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках / Ф.В. Недопекин, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. 224 с.
9. Андрийчук Н.Д. Аэрогидромеханика: учебное пособие для вузов / Н.Д. Андрийчук, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2009. – 516 с.
10. Недопекин Ф.В. Основы механики сплошных сред: учебное пособие для вузов / Ф.В. Недопекин, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2010. – 277 с.

## R e f e r e n c e s

1. Sokolov V.Y. Aerodynamika hazovyykh potokov v kanalakh slozhnykh ventilyatsionnykh system. [Tekst] – Luhansk: VUHU, 1999. – 200 s.
2. Mekler V.Ya. Ventilyatsiya y kondytsyonirovaniye vozdukha na mashynostroytelnykh zavodakh [Tekst]: Spravochnyk. – M.: Mashynostroeniye, 1980. – 335 s.
3. Miasnykov A.F., Myller Yu.A., Komarov N.E. Ventilyatsionnyye sooruzheniya v uholnykh shakhtakh. [Tekst] – M.: Nedra, 1983. – 270 s.
4. Elterman V.M. Ventilyatsiya khymycheskykh proyzvodstv. [Tekst] – M.: Khymiya, 1980. – 284 s.
5. Kovalenko A.A. Osnovy tekhnicheskoi mekhanyky zhydkostey y hazov: uchebnoye posobyе dlia vuzov / A.A. Kovalenko, V.Y. Sokolov y dr. - Luhansk: VUHU, 1998. - 278 s.
6. Kovalenko A.A. Aerohydromekhanika. Ch. 7. Odnomernyye techeniya ydealnogo haza: uchebnoye posobyе dlia vuzov / A.A. Kovalenko, Sokolov V.Y. y dr. – Luhansk: VNU, 2001. – 48 s.

7. Andryichuk N.D. Puty sovershenstvovaniya system teplosnabzheniya / N.D. Andryichuk, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2003. – 244 s.
8. Nedopekyn F.V. Dyffuzyionnyye protsessy v statsyonarnyykh hazovyykh potokakh / F.V. Nedopekyn, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2007. 224 s.
9. Andryichuk N.D. Aerohydromekhanika: uchebnoye posobyе dlia vuzov / N.D. Andryichuk, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2009. – 516 s.
10. Nedopekyn F.V. Osnovy mekhanyky sploshnykh sred: uchebnoye posobyе dlia vuzov / F.V. Nedopekyn, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2010. – 277 s.

**Соколов В.І. Моделювання газодинамічних характеристик вентиляційних систем на основі їх об'єктної декомпозиції**

*Представлена методика розрахунку газодинамічних характеристик промислових вентиляційних систем на основі їх об'єктної декомпозиції. В системі виділені типові розрахункові елементи, структури і зв'язку, на підставі чого побудована узагальнена математична модель. Розглянуто вихідні дані для моделювання характеристик системи.*

**Ключові слова:** вентиляційна система, декомпозиція, тиск, витрата, розрахунковий елемент, конструктивний вузол, замкнений контур.

**Sokolov V.I. Modeling of gas dynamic characteristics of the ventilation systems based on their object-oriented decomposition**

*The technique of calculating the gas dynamic characteristics of industrial ventilation systems based on their object decomposition. The system highlighted the typical elements of the design, structure and communication, on the basis of which the generalized mathematical model is built. We consider the initial data for modeling of system performance.*

**Keywords:** ventilation system, decomposition, pressure, flow, billing element, structural unit, a closed circuit.

**Соколов Володимир Ілліч** – д.т.н., проф., зав. кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк). [sokolov.snu.edu@gmail.com](mailto:sokolov.snu.edu@gmail.com)

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 22.09.2016