DOI: 10.37414/2075-1338-2026-125-2-58-65 УДК 533.6.08 : 519.6

Применение метода численной аэродинамической «продувки» для определения необходимого количества датчиков скорости и способа их размещения в воздуховодах спецвентиляции

А.Р.Аветисян [1], С.Л.Гаврилов [1], В.Н.Долгов [1], С.А.Шикин [1] А.В.Виноградов [2], А.В Долгих [2]

[1] ИБРАЭ РАН, г. Москва

[2] Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ, г. Москва

Настоящая работа посвящена обоснованию выбора количества и местоположения датчиков скорости на основе трехмерного моделирования течения воздуха в элементах системы вентиляции. Местоположение и количество датчиков скорости, в зависимости от геометрических параметров воздуховодов, регулируются ГОСТ 12.3.018-79 и ГОСТ 8.361-79, основанными на эмпирических моделях течения воздуха в каналах различной формы. В реальных условиях эти требования не всегда можно выполнить. Место установки датчиков часто приходится выбирать с учетом удобства эксплуатации, а не аэродинамики. Исходя из этих соображений выбрано место установки датчиков измерения скорости в элементе вентиляционной системы на основе трехмерного моделирования течения воздуха. Целью работы является расчетное определение количества датчиков и их местоположения, а также доказательство его корректности. Цель считается достигнутой, если осредненные значения скорости потока в местах расположения датчиков отличаются от средних значений скорости в соответствующих сечениях в пределах, не более чем на 10%. Выполненные расчеты позволили выбрать оптимальное количество и расположение датчиков скорости воздуха. В результате отклонения от среднего значения по сечению не превышают 5%. Таким образом, показана правомерность предложенного количества датчиков для измерения скорости потока и мест их установки в вентиляционной системе сложной конфигурации.

Ключевые слова:

АСРК, вентиляция, численная аэродинамическая «продувка», измерение скорости течения воздуха.

Системы вентиляции помещений радиационно опасных предприятий и объектов имеют ключевое значение для обеспечения безопасности персонала, населения близлежащих территорий и окружающей среды. Для непрерывного радиационного контроля выбросов газовых и газо-аэрозольных смесей в системах вентиляции применяются автоматизированные системы контроля (АСРК). Эти системы должны быть снабжены датчиками измерения скорости потока в элементах систем вентиляции. Местоположение и количество таких датчиков в зависимости от геометрических параметров воздуховодов регулируются ГОСТами [1,2], основанными на эмпирических моделях течения воздуха в каналах различной формы. Однако на практике возникают проблемы, когда требуемого количества и местоположения датчиков скорости невозможно достичь по техническим условиям и по способам монтажа и обслуживания. Для разрешения этих проблем в настоящее время есть возможность пространственного (трехмерного) моделирования потока воздуха в элементах системы вентиляции с использованием верифицированных программных комплексов на быстродействующих компьютерах [3].

Возможность учета множества режимных и геометрических параметров в этих программных комплексах позволяет говорить о численной аэродинамической «продувке». Такой подход широко используется в различных областях промышленности, в частности, в авиастроении, автомобилестроении, турбостроении и так далее.

Настоящая работа посвящена обоснованию выбора количества и местоположения датчиков скорости на основе трехмерного моделирования течения воздуха в элементах системы вентиляции.

Целью работы является расчетное определение количества датчиков и их местоположения, а также доказательство корректности этого расчета. Цель считается достигнутой, если осредненные

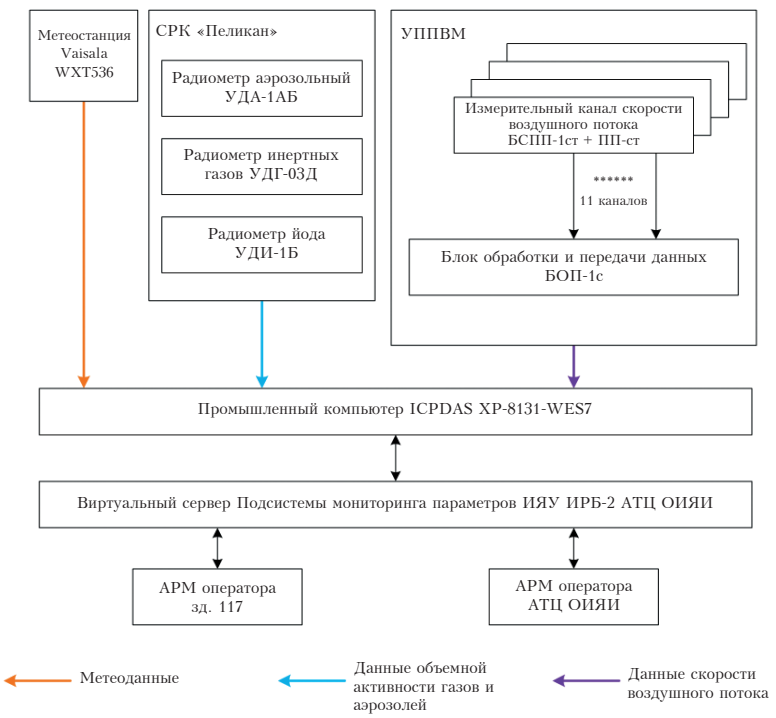


Рис.1. *Функциональная схема АСРК ИЯУ ИБР-2.*

значения скорости потока в местах расположения датчиков отличаются от средних значений скорости в соответствующих сечениях не более чем на 10%.

Этапы достижения цели работы включают:

- выбор места и количества датчиков в элементах вентиляционной системы исходя из соображений возможности и удобства монтажа и обслуживания;
- разработка цифровых трехмерных твердотельных моделей этих элементов;
- выбор математической модели и численных методов ее реализации;
- генерация расчетных сеток, проведение расчетов;
- анализ результатов и выводы.

Описанные в работе расчеты выполнялись для системы спецвентиляции исследовательской ядерной установки ИБР-2 в Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна.

Выполнение расчетов

На рис.1 представлена функциональная схема АСРК ИЯУ ИБР-2.

Для определения параметров воздушных потоков в спецвентиляции ИБР-2 применена установка УППВМ. Сигналы от датчиков скорости поступают в блок обработки БОП-1с, который обеспечивает их питанием и производит обработку и передачу информации на сервер через последовательный интерфейс RS-485. Блок обработки БОП-1с также обеспечивает расчет мгновенного расхода воздуха как произведения средней скорости воздушного потока на площадь сечения венттрубы.

Совместно с УППВМ работают установки УДА-1АБ и УДГ-03Д, которые определяют удельную объемную активность воздуха внутри венттрубы.

Выброс за произвольное время рассчитывается сервером системы как интеграл произведения мгновенного расхода на удельную активность.

Для численной продувки вентиляционной системы необходимо иметь цифровой трехмерный образ объекта моделирования. На рис.2 представлены фотография и твердотельная трехмерная модель элемента рассматриваемой системы вентиляции. На основании этой модели построена пространственная расчетная сетка.



Рис.2. *Фотография и твердотельная трехмерная модель элементов рассматриваемой системы вентиляции.*

Табл.1.

Номинальный диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Фактически измеренный внутренний диаметр, мм	Паспортная производительность, м³/час	Расчетная максимальная скорость потока, м/с	Кол-во датчиков скорости, шт.	Способ установки
1000	4	950	24500	8,67	3	Равномерно на кронштейне

Математическая модель

От выбора математической модели, то есть системы дифференциальных уравнений для расчетного анализа трехмерных течений зависят качество (адекватность и точность) и объем необходимых вычислительных ресурсов, таких как оперативная память и время расчетов. Поэтому математическая модель должна быть по возможности минимальная, но без потери адекватности.

В рассматриваемом анализе течение воздуха считается установившимся. Температура, как в несущем потоке, так и в окружающей среде, постоянна. В табл.1 приведены некоторые конструктивные и режимные параметры, на основе которых проведены оценки параметров течения: числа Маха $M = W/C$ и числа Рейнольдса $Re = \frac{WD}{\nu}$, где W, C – скорость потока и скорость звука, соответственно, D – характерный диаметр соответствующего элемента вентиляционной системы, ν – кинематическая вязкость.

Принимая во внимание, что скорость звука для воздуха C = 345 м/с, $\nu = 1{,}54 \cdot 10^{-5}$ м²/с, значения M и Re для рассматриваемых скоростей на входе в элемент вентиляционной системы равны 0,035 и 534535, соответственно.

Эти величины показывают, что течение является несжимаемым и турбулентным. Для моделирования таких течений можно пользоваться стандартной $(k-\varepsilon)$ моделью турбулентности. Таким образом, нижеприведенная система уравнений описывает математическую модель течения газа в элементах рассматриваемой в работе вентиляционной системы:

· уравнение неразрывности:

$$divW = 0\,, \tag{1}$$

· уравнение сохранения импульса:

$$\rho = \frac{\partial W_i W_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial \left\langle u_i' u_j' \right\rangle}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 W_i}{\partial^2 x_i}\,. \tag{2}$$

В рамках модели турбулентности для определения рейнольдсовых напряжений используются градиентные соотношения Буссинеска с изотропной турбулентной вязкостью:

$$\left\langle u_i' u_j' \right\rangle = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_T \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial W_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right),$$

$$\rho = \frac{\partial W_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho \Pi - \rho \varepsilon\,, \tag{3}$$

$$\rho = \frac{\partial W_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(c_{\varepsilon 1} \Pi + c_{\varepsilon 2} \varepsilon \right), \tag{4}$$

где $\Pi = -\left\langle u_i' u_j' \right\rangle \partial W_i / \partial x_j$ – порождение турбулентной энергии.

В рамках стандартной высокорейнольдсовой $(k-\varepsilon)$ модели турбулентности коэффициент турбулентной вязкости определяется соотношением [3]:

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Значения постоянных в (3)-(7) наиболее часто принимаются равными: $\sigma_k = 1{,}0$; $\sigma_\varepsilon = 1{,}3$; $c_{\varepsilon 1} = 1{,}44$; $c_{\varepsilon 2} = 1{,}92$; $c_\mu = 0{,}09$.

Граничные условия для уравнений (6), (7) задаются на основе метода пристеночных функций. В рамках такого подхода граничные условия задаются не на самой стенке, а на некотором расстоянии от нее вне области вязкого подслоя, в так называемом логарифмическом слое ($y_+ > 30$). В этой области течения турбулентная энергия и скорость ее диссипации определяются соотношениями:

$$k = \frac{u_*^2}{c_\mu^{1/2}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y}. \quad (6)$$

Динамическая скорость находится из универсального логарифмического профиля скорости в пристеночной области:

$$\frac{W}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y_+ + A, \quad (7)$$

где постоянные считаются равными: $\kappa = 0{,}4$; $A = 5{,}5$.

Временной интегральный масштаб турбулентности задается соотношением:

$$T_L = \frac{3c_\mu}{2Sc_T} \frac{k}{\varepsilon}.$$

Дискретизация уравнений и выбор численного метода

Для решения дифференциальных уравнений (1)-(4) с учетом (5)-(7) необходимо получить их дискретный аналог. В настоящей работе использовались методы, включенные в программный комплекс OpenFOAM, а именно, методы конечных элементов второго порядка аппроксимации по пространству, основанные на неструктурированных сетках. Сетки могут состоять как из тетраэдров, так и из призм. Требования к сеткам состоят в следующем:

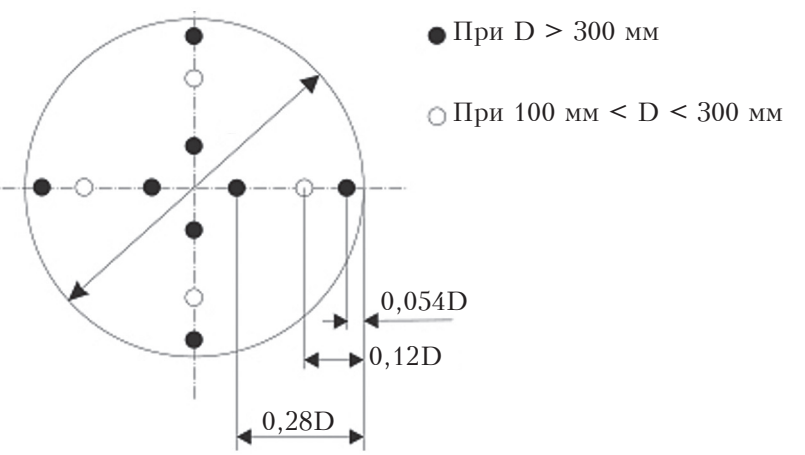


Рис.3. *Схема расположения датчиков измерения скорости согласно ГОСТ 12.3.018-79.*

- достаточное количество расчетных узлов для обеспечения точности решения в ядре потока;
- достаточное количество пространственных расчетных узлов в пристеночной области для обеспечения точности аппроксимации граничных условий (6)-(7). На основании этих требований построена расчетная сетка, состоящая из 856018 элементов.

Результаты расчетов

Местоположение и количество датчиков скорости в зависимости от геометрических параметров воздуховодов регулируются ГОСТами 12.3.018-79 и 8.361-79, основанными на эмпирических моделях течения воздуха в каналах различной формы.

В реальных условиях эти требования не всегда можно выполнить. Место установки датчиков часто приходится выбирать с учетом удобства эксплуатации, а не аэродинамики. Исходя из этих соображений выбрано место установки датчиков измерения скорости в элементе вентиляционной системы, показанной на рис.2. Три датчика закреплены в венттрубе на кронштейне в плоскости на высоте 0,5 метра от пола на равном удалении друг от друга.

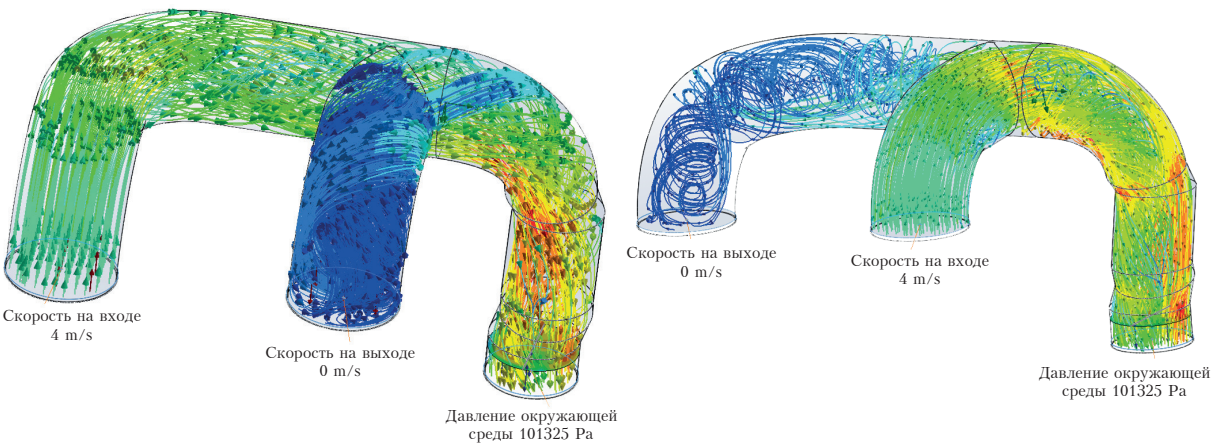


Рис.4. *Линии тока при включенном дальнем и ближнем вентиляторе соответственно.*

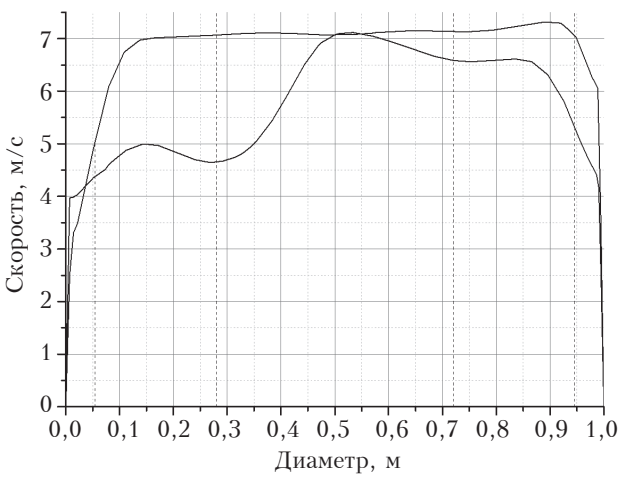


Рис.5. *Распределение скорости вдоль осей установки датчиков по ГОСТ при включенном дальнем вентиляторе. Вертикальные линии обозначают места расположения датчиков.*

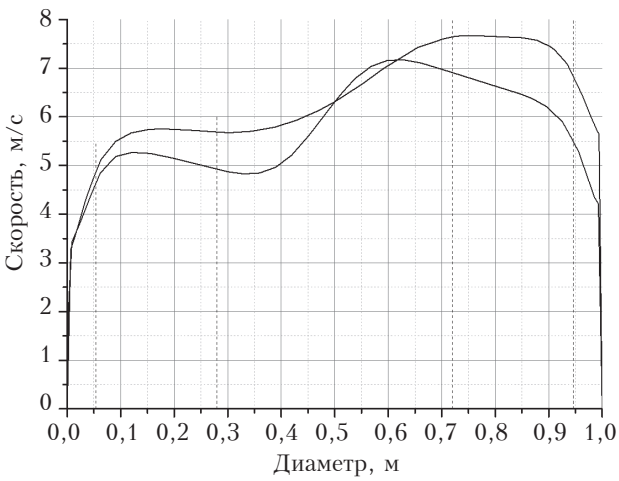


Рис.6. *Распределение скорости вдоль осей установки датчиков по ГОСТ при включенном ближнем вентиляторе. Вертикальные линии обозначают места расположения датчиков.*

Согласно ГОСТ 12.3.018-79, в рассматриваемой венттрубе должны быть установлены 8 датчиков по схеме, приведенной на рис.3.

На основе вышеописанной модели и расчетной сетки были проведены расчеты для двух режимов работы рассматриваемого элемента вентиляционной системы:

- включен только дальний вентилятор;
- включен только ближний вентилятор.

Параметры среды для численного моделирования следующие:

- рабочая среда – воздух;
- давление окружающей среды – 1 бар;
- температура – плюс 25 °С.

Табл.2. *Результаты расчетов для включенного дальнего вентилятора.*

Средняя скорость по сечению, м/с	Средняя скорость в точках по ГОСТ	Отклонение от среднего, %	Средняя скорость от 3-х датчиков	Отклонение от среднего, %
6,124	5,9	4	6,067	0,9

Табл.3. *Результаты расчетов для включенного ближнего вентилятора.*

Средняя скорость по сечению, м/с	Средняя скорость в точках по ГОСТ	Отклонение от среднего, %	Средняя скорость от 3-х датчиков	Отклонение от среднего, %
5,83	5,875	0,8	6,067	4

Общая картина течения, соответствующая указанным режимам течения, приведена на рис.4.

На рис.5 и 6 представлены распределения скорости вдоль оси установки датчиков по ГОСТ при включенном дальнем или ближнем вентиляторах соответственно. Вертикальные линии обозначают места расположения датчиков.

В табл.2 и 3 приведены результаты расчетов средних скоростей для режимов а) и б) как для установки датчиков по ГОСТ, так и для установки предложенным авторами способом. В этих же таблицах представлены отклонения этих скоростей от средней скорости по сечению.

Как видно из представленных результатов, отклонения от среднего значения по сечению не превышают 5%. Таким образом, показана правомерность использования предложенного количества и способа установки датчиков для измерения скорости потока в вентиляционных системах сложной конфигурации.

Выводы

Выполненные расчеты позволили выбрать оптимальное количество и расположение датчиков скорости воздуха. В результате отклонения от среднего значения по сечению не превышают 5%. Таким образом, показана правомерность предложенного количества датчиков для измерения скорости потока и мест их установки в вентиляционной системе сложной конфигурации.

Литература

1. **ГОСТ 12.3.018-79. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний.**
2. **ГОСТ 8.361-79. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы.**
3. **Аветисян А.Р., Гаврилов С.Л., Шикин С.А., Иванов И.В., Шаталин А.И. Применение метода численного моделирования трехмерного течения рабочей среды для оценки изокинетичности пробоотбора в системах//АНРИ. 2025. № 2(121) С. 65-71.**
4. **B.E. Launder, D.B. Spalding, «The numerical computation of turbulent flows»,** *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, **vol. 3, no. 1, pp. 269-289, 1974.**

Application of the Numerical Aerodynamic «Blowing» Method to Determine the Required Number of Speed Sensors and the Method of their Placement in Special Ventilation Ducts

Avetisyan Artur [1], Gavrilov Sergey [1], Shickin Sergey [1], Dolgov Vladimir [1], Vinogradov Aleksandr [2], Dolgikh Andrei [2]

[1] Nuclear safety institute of Russian academy of sciences, Moscow, Russia

[2] The Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia

Abstract. **This paper is devoted to substantiating the choice of the number and location of velocity sensors based on three-dimensional modeling of air flow in the elements of the ventilation system. The location and number of speed sensors, depending on the geometric parameters of the ducts, are regulated by GOST 12.3.018-79 and GOST 8.361-79, based on empirical models of air flow in channels of various shapes. In real conditions, these requirements may not always be met. The location of the sensors often has to be chosen based on ease of use rather than aerodynamics. Based on these considerations, the location of the velocity sensors in the ventilation system element was chosen based on three-dimensional modeling of the air flow. The purpose of the work is to calculate the number of sensors and their location, and to prove its correctness. The goal is considered achieved if the average values of the flow velocity at the sensor locations differ from the average values of the velocity in the corresponding sections by no more than 10%. The calculations performed made it possible to select the optimal number and location of air velocity sensors. As a result, deviations from the average cross-section value do not exceed 5%. Thus, the validity of the proposed number of sensors for measuring flow velocity and their installation locations in a complex ventilation system is shown.**

Keywords: *ARMS, ventilation, numerical aerodynamic «purge», measurement of the air flow velocity.*

А.Р.Аветисян [1] (к.ф.-м.н., с.н.с.), С.Л.Гаврилов [1] (зав. отд.), В.Н.Долгов [1] (зав. лаб.), С.А.Шикин [1] (нач. отд.), А.В.Виноградов [2] (гл. инж. лабор.), А.В. Долгих [2] (гл. инж. установки)

[1] ИБРАЭ РАН, г. Москва

[2] Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ, г. Москва

Контакты: gav@ibrae.ac.ru, +7 (495) 955-22-36