

Применение метода численного моделирования трехмерного течения рабочей среды для оценки изокинетичности пробоотбора в системах АСРК

Для оценки изокинетичности пробоотбора с помощью зонда щелевого типа был применен метод численного моделирования пространственного течения рабочей среды. Была создана трехмерная цифровая модель рабочего участка, включающего пробоотборный зонд. На основе анализа условий течения, концентрации и размеров аэрозольных частиц была сформулирована соответствующая математическая модель, учитывающая турбулентность течения и шероховатость поверхностей. Построена неструктурированная расчетная сетка для аппроксимации дифференциальных уравнений модели методом конечных объемов второго порядка. Проведены расчеты четырех режимов течения для определения степени изокинетичности пробоотбора с помощью конкретного зонда щелевого типа. Для одного из режимов течения проведены расчеты для различных давлений на выходе пробоотборного зонда. Расчеты показывают, что степень изокинетичности пробоотбора можно управлять за счет давления на выходе.

Ключевые слова: АСРК, пробоотбор, пробоотборный зонд, изокинетичность.

**А.Р.Аветисян¹, С.Л.Гаврилов¹,
С.А.Шикин¹, И.В.Иванов²,
А.И.Шаталин²**

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской Академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва

² Научно производственное предприятие «Доза», г. Зеленоград

Одной из существенных составляющих объема контроля автоматизированных систем радиационного контроля (АСРК) атомных АЭС и других радиационно опасных предприятий и объектов является контроль газовых и газоаэрозольных смесей в системах вентиляции. Для контроля состава газоаэрозольных смесей применяются системы пробоотбора различного типа и конструкций и, соответственно, устройства и установки детектирования радиоактивных газов и аэрозолей. Важным условием корректности измерений является представительность пробоотбора газоаэрозольной смеси из потока в вентиляционной

трубе или иных трубопроводах. Критерием представительности пробоотбора является условие его изокинетичности или равенства скоростей потока в трубопроводе и на входе пробоотборного устройства. При абсолютном равенстве скоростей изокинетичность считается равной 100%. Если скорость потока на входе пробоотборного устройства больше скорости потока в трубопроводе (например, в два раза), то пробоотбор уже будет анизокинетичным (в данном случае 200%) и наоборот (если меньше, например, в 2 раза, то 50%) [1].

Для задачи оценки изокинетичности пробоотбора необходимо было смоделировать процесс пробоотбора с помощью конкретного зонда щелевого типа, разработанного для одной из систем АСРК для атомной станции.

Исходные данные для расчетов были заданы следующие:

- Тип зонда щелевого типа – ВКМ.418311.014-08 (производство НПП «Доза»).
- Параметры среды для численного моделирования трехмерного течения рабочей среды в пробоотборном щелевом зонде следующие:
 - рабочая среда: воздух, референсное давление 1 Бар;
 - статическое давление на выходе пробоотборного зонда 10 кПа;
 - на входе трубопровода задается средняя скорость: от 3 до 30 м/с, (расчеты должны проводиться для скоростей 3, 10, 20, 30 м/с);
 - диаметр трубопровода $D_n = 50$ мм;
 - температура $+25^\circ\text{C}$;
 - состояние частиц – отталкивание;
 - гравитация – наличие, (объемная плотность $\rho = 1000$ кг/м³),
 - размер частиц от 0,1 до 0,3 мкм;
 - предельно допустимые концентрации частиц:
 - 0,1 мкм – 100 частиц/м³,
 - 0,2 мкм – 24 частиц/м³,
 - 0,3 мкм – 10 частиц/м³,
 - шероховатость стенок воздухопроводов Rz2.

На основе геометрических параметров данной модели зонда была построена трехмерная модель рабочего участка, находящегося во внутреннем объеме щелевого зонда и тройника (рис.1). При этом толщина стенки щелевого зонда считается бесконечно тонкой, а длина трубы ограничена размером верхнего отвода тройника. На цилиндрической поверхности зонда была выделена отдельная поверхность щели для задания граничных условий.

Для выбора математической модели, описывающей течение воздуха с частицами, проведены оценки некоторых параметров течения: числа Маха $M = \frac{W}{C}$ и числа Рейнольдса $Re = \frac{WD}{\nu}$, где W , C – скорость потока и скорость звука, соответственно, D – диаметр входа в рабочий участок, ν – кинематическая вязкость.

В табл.1 приведены значения M и Re для рассматриваемых скоростей на входе в рабочий участок при скорости звука для воздуха: $C = 345$ м/с, $\nu = 1,54 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Приведенные в табл.1 величины показывают, что течение в трубопроводе и в пробоотборнике является несжимаемым и турбулентным.

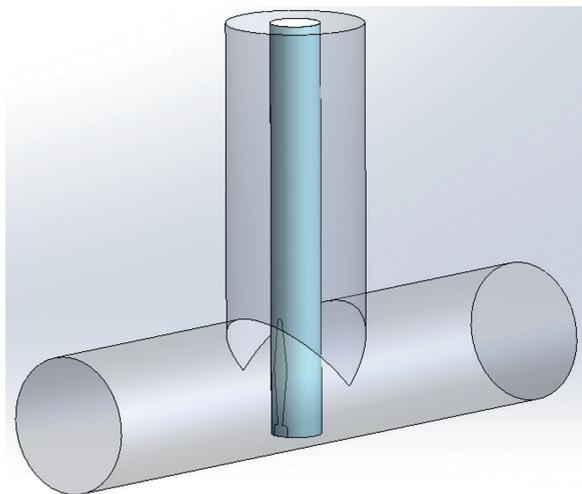


Рис.1. Трехмерная модель рабочего участка пробоотборника.

Табл.1.

Скорость, м/с	число Маха	число Рейнольдса
3	0,009	9740
10	0,03	32467
20	0,06	64935
30	0,09	97402

Значения объемных концентраций аэрозольных частиц и их размеров, приведенных в настоящей работе, дают ничтожно малый вклад в плотность рабочей среды – воздуха – и этим вкладом можно пренебречь. Пренебрегаем также эффектами столкновения частиц.

Для определения поведения аэрозолей в потоке воспользуемся уравнением движения твердой или жидкой аэрозольной частицы в виде:

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{d\tau} = \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v}_p)}{\tau_p} + (I - A)\mathbf{g} + A \frac{D\mathbf{u}}{D\tau} + \mathbf{f}_L + \mathbf{f}_{TM} + \mathbf{f}_B, \quad (1)$$

$$A = \frac{(I + C)\rho_f}{\rho_p + C_A\rho_f}$$

Здесь τ – время, \mathbf{v}_p – скорость частицы, \mathbf{u} – скорость несущей среды, τ_p – время динамической релаксации частицы, \mathbf{g} – ускорение силы

тяжести, ρ_p и ρ_f – плотности материала частиц и несущей среды. Параметр A , где C_A – коэффициент присоединенной массы, характеризует отношение плотностей материала частиц и несущей среды. Символ $D/D\tau$ обозначает субстанциональную производную, т. е.

$$\frac{D\mathbf{u}}{D\tau} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \tau} + u_k \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x_k}.$$

Первый член в правой части уравнения (1) описывает силу гидродинамического сопротивления. Второй член учитывает силу тяжести. Третий член обусловлен эффектами вытесненной и присоединенной масс и проявляется благодаря конвекции несущего потока. Четвертый член \mathbf{f}_L обозначает так называемую подъемную силу, индуцированную градиентом скорости несущего потока. Пятый член обозначает силу термофореза \mathbf{f}_{TM} , возникающую при движении частицы в неизотермической среде. Последний член определяет случайную броуновскую силу \mathbf{f}_B . Этими членами мы пренебрегаем в силу изотермического течения и отсутствием столкновений между частицами.

Уравнение движения аэрозольной частицы (1) при рассмотрении турбулентного течения представляет собой уравнение типа Ланжевена, поскольку скорость несущего потока \mathbf{u} является случайной функцией. С целью перехода от динамических стохастических уравнений движения отдельных частиц к статистическому

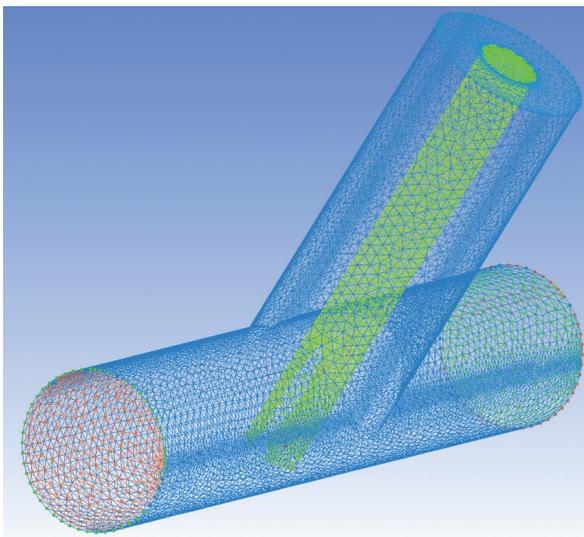


Рис.2. Расчетная сетка.

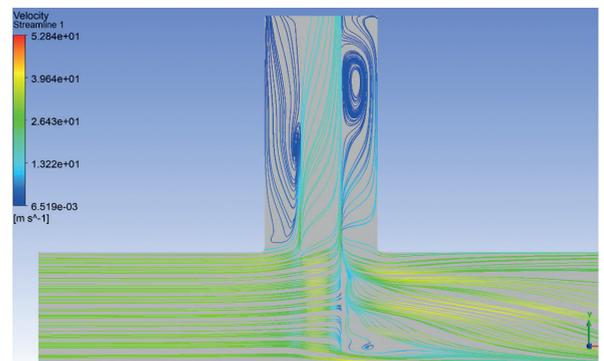


Рис.3. Линии тока на плоскости центрального сечения рабочего участка.

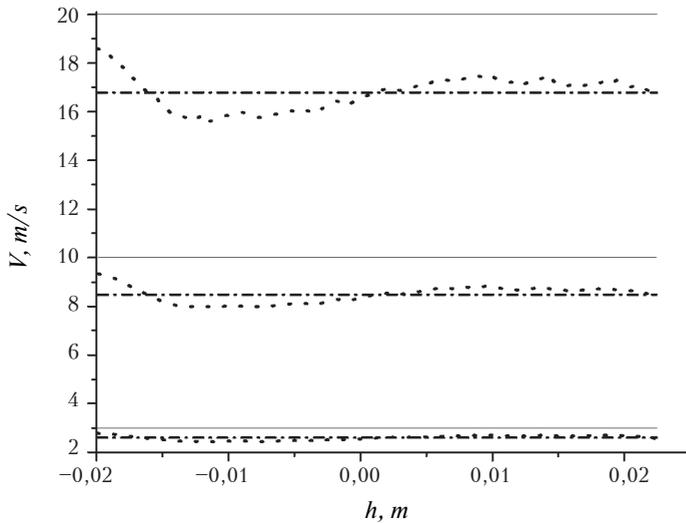


Рис.4. Распределение скорости по высоте щели пробоотборника в центральном сечении для трех скоростей на входе – 3, 10 и 20 м/с. Сплошная прямая – входная скорость, точно-пунктирная прямая – средняя скорость на входе в зонд. Пунктирная линия – расчет.

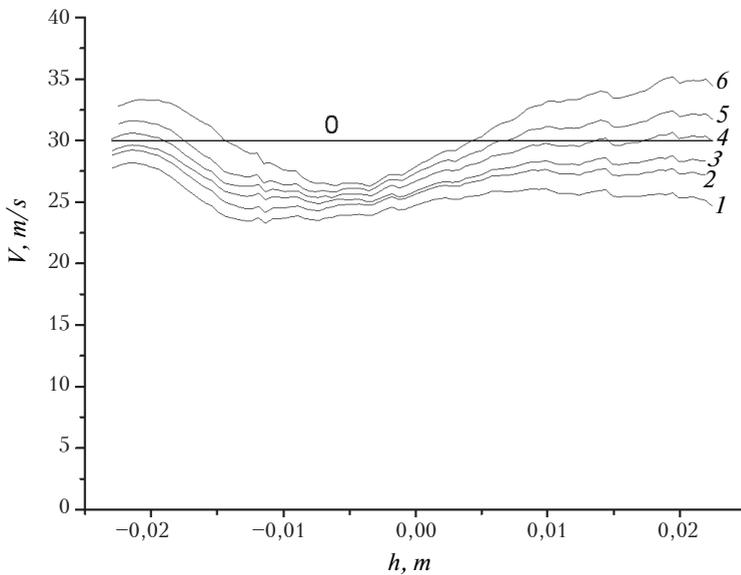


Рис.5. Распределение скорости по высоте щели пробоотборника в центральном сечении при разных давлениях (1–10 кПа, 2–9,8 кПа, 3–9,7 кПа, 4–9,5 кПа, 5–9,3 кПа, 6–9 кПа).

описанию ансамбля частиц может быть построено кинетическое уравнение для функции плотности вероятности распределения скорости [1]. Путем интегрирования по подпространству скоростей из кинетического уравнения получается цепочка уравнений для статистических моментов – система непрерывных уравнений сохранения массы, количества движения, кинетических напряжений и т. д. для ансамбля аэрозольных частиц. Для малоинерционных (мелкодисперсных) частиц, время динамической релаксации которых τ_p меньше лагранжевого интегрального масштаба

турбулентности T_L из системы непрерывных уравнений сохранения может быть получено следующее выражение для осредненной скорости движения аэрозолей [4]:

$$V_i = W_i - D_T \frac{\partial \ln \Phi}{\partial x_i} + (1 - A) \tau_p \left(g_i + F_{Li} - \frac{DW_i}{D\tau} \right). \quad (2)$$

Здесь W_i – осредненная скорость несущего потока, Φ – объемная концентрация аэрозольных частиц, D_T – коэффициент турбулентной диффузии безынерционной примеси.

Первый член в правой части (2) описывает перенос аэрозолей со скоростью несущей сре-

ды. Второй член определяет диффузионный перенос, обусловленный турбулентным движением частиц. Последующие члены обозначают, соответственно, перенос частиц под действием силы тяжести, подъемной силы, а также инерционный перенос частиц вследствие отклонения их траекторий от линий тока несущего потока при их искривлении и из-за нестационарности течения.

Время динамической релаксации небольшой аэрозольной частицы определяется соотношением:

$$\tau_p = \frac{\tau_{p0} (1 + C_A \rho_f / \rho_p) \varphi_1(Kn)}{\varphi_2(Re_p)}, \quad (3)$$

$$\tau_{p0} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \rho_f \nu_f}.$$

С учетом характеристик рассматриваемой среды и (3) из соотношения получим:

$$V_i \approx U_i.$$

Это означает, что частицы имеют скорость несущего потока. Таким образом, в рамках $(k - \varepsilon)$ модели турбулентности для описания течения в рабочем участке пробоотборника необходимо решить следующую систему уравнений:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial W_i}{\partial x_i} = 0, \quad (4)$$

- уравнение сохранения импульса:

$$\rho \frac{\partial W_i W_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 W_i}{\partial x_j^2}. \quad (5)$$

В рассматриваемом приближении обратное влияние капель на турбулентность несущей среды также можно не принимать во внимание. Поэтому уравнения для турбулентной энергии и скорости ее диссипации представляются в обычном для стандартной $(k - \varepsilon)$ модели турбулентности виде:

$$\rho \frac{\partial W_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho \Pi - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial W_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} \Pi + c_{\varepsilon 2} \varepsilon), \quad (7)$$

где $\Pi = - \langle u'_i u'_j \rangle \partial W_i / \partial x_j$ – порождение турбулентной энергии.

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

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Значения постоянных в (5)–(8) 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:

$$k = \frac{u_*^2}{c_\mu^{1/2}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y}. \quad (9)$$

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

$$\frac{W}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y_+ + A, \quad (10)$$

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

Временной интегральный масштаб турбулентности задается соотношением:

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

Здесь Sc_T – турбулентное число Шмидта, принимается равным 0,9.

Следует отметить, что вышеприведенная математическая модель может быть использована для описания течений с частицами размеров до 20–30 мкм при концентрациях до 10–15%.

Для решения дифференциальных уравнений (4)–(7) с учетом (8)–(10) необходимо было получить их дискретный аналог. В настоящей работе использовались методы, включенные в программный комплекс OpenFOAM (www.openfoam.org), методы конечных объемов второго порядка аппроксимации по пространству, основанные на неструктурированных сетках, включающих как тетраэдры, так и призмы. Главное требование к сетке, помимо достаточного количества пространственных расчетных узлов, заключается в наличии пристеночного слоя ячеек для обеспечения точности аппроксимации граничных условий (9)–(10) и учета шероховатости.

На рис.2 приведена расчетная сетка, удовлетворяющая указанным условиям. Общее число узлов – 140966, общее число элементов – 391602. Такая сетка обеспечивает точность результатов численного решения в пределах одного процента.

Расчеты проводились для ряда различных скоростей потока на входе в трубопровод (3 м/с, 10 м/с, 20 м/с и 30 м/с).

Основные результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4.

На рис.3 приведены линии тока на плоскости центрального сечения рабочего участка.

На рис.4 представлено рассчитанное распределение скорости по высоте щели пробоотборника в центральном сечении.

Сплошная прямая линия соответствует входной скорости, точечно пунктирная прямая – средней скорости. Пунктирная линия соответствует расчету.

Расчетная скорость, усредненная по высоте щели зонда, составила 2,65 м/с, 8,48 м/с, 16,78 м/с, что соответствует степени изокинетичности 87%, 84,8%, 83,9% при скорости на входе в трубопровод 3, 10 и 20 м/с соответственно.

Для режима скорости на входе в трубопровод 30 м/с проведены расчеты для ряда различных давлений на выходе из пробоотборника. На рис.5 приведены распределения скорости по высоте щели пробоотборника в центральном сечении для четырех давлений на выходе из него: 10 кПа; 9,8 кПа; 9,7 кПа; 9,5 кПа; 9,3 кПа; 9 кПа (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответственно). Для этих давлений степень изокинетичности составляет: 84,2%, 87%, 90% и 94%, 97%, 103% соответственно. Таким образом, с помощью управления давлением можно повысить степень изокинетичности.

В результате проведенных расчетов методом численного моделирования трехмерного течения рабочей среды в пробоотборном зонде щелевого типа было показано, что степень изокинетичности пробоотбора с помощью применяемого зонда щелевого типа составила примерно 85% (от 83,9% до 86,6% для разных скоростей потока).

Было показано, что степень изокинетичности может быть повышена за счет небольшого понижения давления на выходе пробоотборного зонда. Так, при уменьшении давления на выходе зонда всего на 0,7 кПа при скорости потока 30 м/с степень изокинетичности составит уже 97%.

Вышеприведенная математическая модель может быть использована для описания течений с частицами размеров до 20–30 мкм при концентрациях до 10–15%.

Кроме того, степень изокинетичности может быть повышена за счет подбора оптимальной формы щели зонда. Для этого представляется перспективным и полезным при конструировании новых пробоотборных устройств проводить модельные расчеты геометрии щелей методом численного моделирования, примененного в данной работе.

Литература

1. ГОСТ Р 9096/ISO 2889-2010. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации твердых частиц ручным гравиметрическим методом.
2. Деревич И.В., Зайчик Л.И. Уравнение для плотности вероятности скорости и температуры частиц в турбулентном потоке, моделируемом гауссовым случайным полем // Прикл. математика и механика. 1990. Т. 54. Вып. 5. С. 767-774.
3. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. М.: Наука, 1994. 320 с.
4. В.Е. Launder, D.B. Spalding, «The numerical computation of turbulent flows», *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, vol. 3, №1, pp. 269-289, 1974.

Application of the Method of Numerical Simulation of the Three-Dimensional Flow of the Working Medium to Assess the Isokineticity of Sampling in ARMS Systems

Avetisyan Artur¹, Gavrilov Sergei¹, Shickin Sergey¹, Ivanov Igor², Shatalin Andrei²

¹Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

²SPC «Doza», Ltd, Zelenograd, Russia

Annotation. To assess the isokineticity of sampling using a slot-type probe, the method of numerical modeling of the spatial flow of the working media was used. A three-dimensional digital model of the work area, including a sampling probe, was created. Based on the analysis of the flow conditions, concentration and size of aerosol particles, an appropriate mathematical model was formulated, considering the turbulence of the flow and the roughness of the surfaces. An unstructured computational grid is constructed for approximating the differential equations of the model by the second-order finite volume method. Calculations of four flow modes were carried out to determine the degree of isokinetic sampling using a specific slot-type probe. For one of the flow modes, calculations were made for different pressures at the outlet of the sampling probe. Calculations show that the degree of isokinetic sampling can be controlled by outlet pressure.

Keywords: ARMS, sampling, sampling probe, isokineticity.

А.Р.Аветисян¹ (к.ф.-м.н., с.н.с.), С.Л.Гаврилов¹ (зав.отд.), С.А.Шикин¹ (зав.отд.),
И.В.Иванов² (вед.инж.), А.И.Шаталин² (директор департа.)

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской Академии наук
(ИБРАЭ РАН), г. Москва

²Научно-производственное предприятие «Доза», г. Зеленоград

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