

УДК 620.165.29

УСРЕДНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УТЕЧКИ ПРОБНОГО ГАЗА ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕЙ

Мясников В.М., Сажин С.Г., Костиков Е.С., Добротин С.А.

Дзержинский политехнический институт Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, Дзержинск, e-mail: sekretar@dfngtu.nnov.ru

Вторичная обработка дефектоскопического сигнала при локализации течей способом щупа, использующим принцип пассивного сканирования, основывается на формализованных параметрах дефектоскопического пика, получаемых из результатов математического моделирования. Математическая модель должна учитывать усреднение концентрации утечки пробного газа в анализируемой пробе, отбираемой из порового пространства. По материалам исследования средней концентрации пробного газа в анализируемой пробе, установлена ее зависимость от типа воздействия на грани пористого листа и характерных размеров области усреднения. Исследование влияния средней концентрации пробного газа в анализируемой пробе на чувствительность контроля целесообразно представить в виде отношения расстояния от течи до точки отбора пробы к характерному размеру области усреднения. Установлено, что при условиях воздействия на грани пористого материала защитного газа чувствительность контроля достигает максимального значения в условиях указанного отношения, равного 0,87. Если формирование утечки происходит в листе пористого материала с ограничивающей плоскостью, а отбор производится с поверхности листа, то максимум средней концентрации отсутствует.

Ключевые слова: течь, локализация течей, пробный газ, утечка

AVERAGING-OUT THE CONCENTRATION OF TRIAL GAS LEAKAGE AT LEAKS LOCALIZATION

Mjasnikov V.M., Sazhin S.G., Kostikov E.S., Dobrotin S.A.

Dzerzhinsky Polytechnic Institute of Nizhegorodsky State Technical University of R.E. Alekseev, Dzerzhinsk, e-mail: sekretar@dfngtu.nnov.ru

Secondary processing of a flaw detecting signal at leaks localization by the method of probe using the principle of passive scanning is based on the formalized operation factors of a flaw detecting peak received by the results of mathematical modelling. The mathematical model should consider averaging-out leak concentration of trial gas in the analyzed test selected from the pore space. On the materials of researching average concentration of trial gas in the analyzed test its dependence on a type of influence on a porous sheet verge is established as well as characteristic sizes of the averaging area. In the analyzed test on sensitivity of the control it is expedient to present research of the influence of average concentration of trial gas in the form of the relation of distance from a leak to a point of selecting a test to the characteristic size of the averaging area. It is established that under conditions of influence on the verge of a porous material of protective gas sensitivity of the control reaches the maximum value in the conditions of the specified relation equal to 0.87. If leak formation occurs in a sheet of a porous material with a limiting plane and selection is made from a sheet surface the maximum of average concentration is absent.

Keywords: leak, leaks localization, trial gas, leakage

Согласно классификационным признакам [1] в установках для локализации течей используется метод активного или пассивного сканирования. Метод пассивного сканирования предполагает равномерное движение датчика регистрации утечки или пробоотборного устройства (щупа) по заданной траектории. Затем дефектоскопическая информация подлежит обработке с целью определения величины течи и её местоположения. Координаты течи находятся путем сопоставления формализованных параметров дефектограммы [2] реального дефектоскопического пика с эталонным, полученным в результате математического моделирования процесса массопереноса пробного газа от течи к датчику течи-скателя. Координаты течи по направлению сканирования определяются по первому моменту, а расстояние от течи до траектории сканирования находится по отношению

начального нулевого момента к высоте дефектоскопического пика [3].

Точность определения положения течи зависит от выбранной математической модели, включающей все стадии процесса переноса утечки пробного газа. Математическая модель, представленная в работе [2], описывает накопление утечки пробного газа в среде материала с пористой структурой. Эта модель применима для потоков отбираемой пробы менее $10^{-4} \text{ м}^3 \times \text{Па/с}$. Для больших потоков математическая модель должна включать в себя стадию усреднения концентрации по области отбора. В связи с этим возникла необходимость исследовать влияние геометрических размеров этой области на среднюю концентрацию пробного газа в ней.

Для поставленной цели сформулированы задачи исследования: выбрать метод усреднения концентрации пробного газа в области отбора пробы; установить взаимно-

связь между характерным размером области усреднения с учетом способа формирования утечки пробного газа, скорости движения щупа и движения анализируемой пробы по капилляру.

Так как накопление утечки целесообразно осуществлять в среде с пористой структурой [2], то необходимо выбрать метод усреднения концентрации пробного газа в окрестности течи. Существует два метода усреднения скалярных или векторных величин в пористом материале: усреднение по пространству пор в элементарном физическом объеме или по элементарному физическому объему [4]. В данной работе усредненная концентрация пробного газа в анализируемой пробе оценивалась по эле-

ментарным физическим объемам. Выбор данного метода обуславливается тем, что концентрационное поле пробного газа описывается с позиции принципа квазигомогенного приближения, который заключается в том, что коэффициент диффузии пробного газа находится на основе коэффициента эффективной диффузии $[D]$, полученного эмпирически.

Установлено, что если отбор пробы происходит из порового канала пористого листа с высотой H , длиной a и шириной b , грани которого орошаются газом, не содержащим пробный, то область усреднения имеет форму усеченной сферы (рис. 1, а), а при накоплении утечки в листе с ограничивающей плоскостью – форму цилиндра (рис. 1, б).

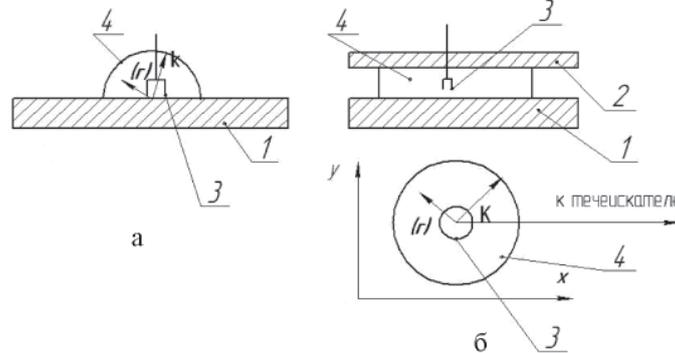


Рис. 1. Области усреднения концентрации пробного газа:
а – с поверхности изделия; б – с ограничивающей плоскостью:
1 – контролируемая поверхность изделия; 2 – ограничивающая плоскость;
3 – пробоотборник; 4 – область усреднения

В обоих случаях характерным размером области отбора является радиус усреднения $\langle r \rangle$, который определяется из баланса потоков анализируемой пробы, поступающих из области усреднения в транспортный капилляр.

В случае отбора пробы с контролируемой поверхности и при накоплении утечки пробного газа в условиях воздействия на грани пористого листа газа, не содержащего пробный, радиус усреднения определяется из равенства, полученного из материального баланса:

$$\langle r \rangle = \sqrt{\frac{d_k^2 W_k}{2\varepsilon W_{\text{ш}}}}. \quad (1)$$

При накоплении утечки с ограничивающей плоскостью радиус усреднения рассчитывается как

$$\langle r \rangle = \frac{\pi d_k^2 W_k}{4\varepsilon H W_{\text{ш}}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{ш}}$, W_k – скорость движения щупа и анализируемой пробы в капилляре; d_k – диаметр капилляра; ε – пористость материала.

$$C(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} C_{mnl} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{l\pi z}{H},$$

Средняя концентрация в анализируемой пробе $\langle C \rangle$ находилась по методу Монте-Карло:

$$\langle C \rangle = \frac{\sum_{k=0}^p C_k}{p},$$

где C_k – значение концентрации утечки в k -й точке, принадлежащей области отбора; p – число точек усреднения.

Координаты точки k определялись из соотношений:

$$x_k = x_{\text{ш}} + \langle r \rangle \cdot d \sin \theta,$$

$$y_k = y_{\text{ш}} + \langle r \rangle \cdot d \cos \theta,$$

где θ , d – случайные величины, имеющие равномерное распределение в области $\{0 \leq d \leq 1\}$; $\{0 \leq \theta \leq 360^\circ\}$, $x_{\text{ш}}$, $y_{\text{ш}}$ – координаты положения щупа.

Ранее [2] было установлено, что концентрационное поле в листе пористого материала описывается уравнением:

$$C_{mnl} = \frac{8 \sum_{i=1}^K q_i \sin \frac{m\pi x_i}{a} \sin \frac{n\pi y_i}{b}}{[D]abH\pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{l^2}{H^2} \right)}$$

где C_{mnl} – поток i -й течи с координатами x_i, y_i .

$$C(x, y) = \int_0^H C(x, y, z) dz = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b},$$

$$C_{mn} = \frac{4 \sum_{i=1}^K q_i \sin \frac{m\pi x_i}{a} \sin \frac{n\pi y_i}{b}}{[D]abH\pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)}$$

Поочередное усреднение по координатам y и x позволяет получить среднюю концентрацию в исследуемой точке

$$C_k = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \cdot \frac{\sin \frac{m\pi \Delta x}{a}}{\frac{m\pi \Delta x}{a}} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi \Delta y}{b}}{\frac{n\pi \Delta y}{b}} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \Delta y \Delta x.$$

Благодаря множителю

$$\frac{\sin \frac{m\pi \Delta x}{a}}{\frac{m\pi \Delta x}{a}} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi \Delta y}{b}}{\frac{n\pi \Delta y}{b}}$$

происходит уменьшение доли вклада в сумму ряда для среднего значения членов с большим значением m, n , что позволяет уменьшить объем вычислений при нахождении C_k , не теряя при этом точности полученных результатов.

Так как сканирование пробоотборника происходит на фиксированной высоте, то нет необходимости учитывать зависимость концентрации от координаты z . Следовательно, в результате интегрирования функции концентрационного поля по z от 0 до H получается уравнение

дении C_k , не теряя при этом точности полученных результатов.

На рис. 2 показана зависимость концентрации на входе в пробоотборник от отношения расстояния R от течи до пробоотборника к радиусу усреднения. Зависимость позволяет установить влияние радиуса усреднения на чувствительность контроля. Результаты получены при формировании утечки в листе пористого материала в условиях орошения его граней газом, не содержащим пробный.

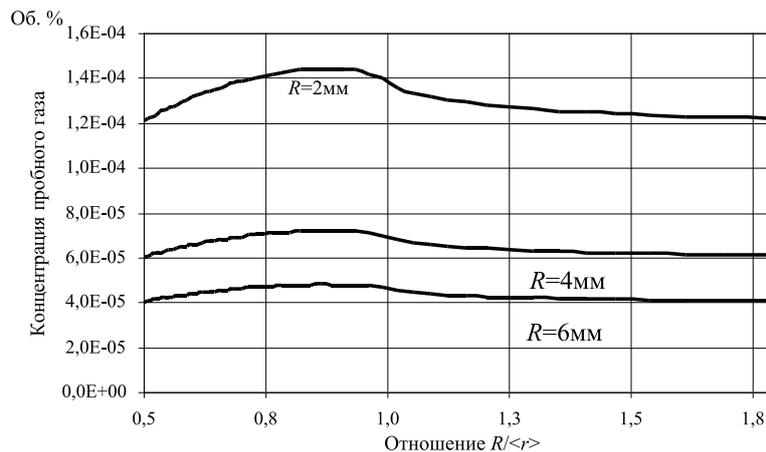


Рис. 2. Зависимость концентрации $\langle C \rangle = R/\langle r \rangle$ на входе в пробоотборник (с орошением газом, не содержащим пробный газ)

Максимальная чувствительность испытания достигается при $R/\langle r \rangle = 0,87$. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что с увеличением радиуса усреднения снижается точность определения положения двух течей в ус-

ловиях наложения их концентрационных полей.

Результаты аналогичных исследований при условии формирования утечки в листе пористого материала с ограничивающей плоскостью показаны на рис. 3.

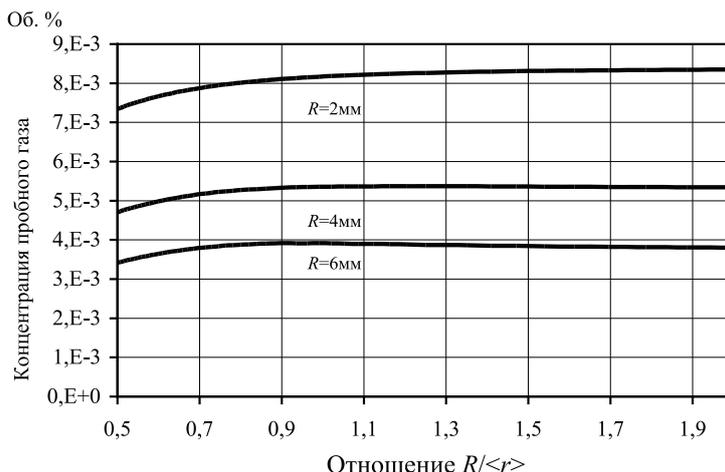


Рис. 3. Зависимость концентрации $\langle C \rangle = R/\langle r \rangle$ на входе в пробоотборник (с ограничивающей плоскостью)

По результатам исследования установлено, что характер зависимости $\langle C \rangle = R/\langle r \rangle$ не меняется в случае, когда область усреднения ограничена окружностью, расположенной в плоскости, параллельной контролируемой поверхности. Необходимость этих результатов вызвана моделированием процесса поиска течей в условиях отсутствия операций отбора и транспортировки анализируемой пробы из порового пространства [5]. В этом случае преобразование утечки происходит в результате контакта чувствительного элемента детектора с поверхностью пористого листа.

В заключение следует отметить, что исследованная зависимость влияния геометрических размеров области отбора на среднюю концентрацию пробного газа в ней показывает, что концентрация утечки в анализируемой пробе зависит от характерного размера $\langle r \rangle$ зоны усреднения при потоках больше $10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Концентрация в зоне усреднения связана с конструктивными и технологическими параметрами средств отбора пробы и способами накопления утечки в среде с пористой структурой. Максимальная чувствительность достигается при $R/\langle r \rangle = 0,87$.

Список литературы

1. Сажин С.Г., Мясников В.М. Классификация установок для локализации течей // Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 88–93.
2. Сажин С.Г., Мясников В.М. Определение координат мест негерметичности в сварных швах // Мир измерений. – 2007. – №11. – С. 47–49.
3. Сажин С.Г., Добротин С.А., Мясников В.М. Газоаналитический метод определения мест течи // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 2. – С. 8–10.
4. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
5. Пат. 101187 RU, МПК G 01 M 3/02. Устройство для локализации течей / Е.С. Костиков, В.М. Мясников, С.Г. Сажин. – Нижегородский государственный технический университет. – № 2010117112/28; Заявл. 29.04.2010; Оpubл. 10.01.2011.

Рецензенты:

Никандров И.С., д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт и механика» Дзержинского политехнического института НГТУ им. Р. Е. Алексева, г. Дзержинск;

Луконин В.П., д.т.н., профессор кафедры «Автоматизация и информационные системы» Дзержинского политехнического института НГТУ им. Р. Е. Алексева, генеральный директор ФГУП «НИИ полимеров им. академика В. А. Каргина», г. Дзержинск.

Работа поступила в редакцию 07.07.2011.