

УДК 628.8

ЕЖИ ПИОТРОВСКИ, канд. техн. наук  
*Свентокшиская Политехника, г.Кельце (Польша)*

## **НОВАЯ МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА В ПОМЕЩЕНИИ**

Предлагается метод маркирующего газа для решения проблем вентиляции и ин-  
фильтрации воздуха, а также определения интенсивности воздухообмена.

Для улучшения тепловых характеристик возводимых и существующих зданий необходимы эффективные методы исследования интенсивности воздухообмена в помещениях различных типов. Особого внимания заслуживает экспериментальный метод, предполагающий использование маркирующих газов. В этом методе интенсивность воздухообмена является функцией концентрации маркирующего газа, содержащегося в воздухе исследуемого объекта. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований процесса воздухообмена с применением маркеров, наиболее точно отражают реальную картину процесса. Нужно заметить, что различие в методах, использующих индикаторный газ, заключается в разновидностях применяемого газа и точности измерительной аппаратуры. Главным достоинством указанного метода исследований является возможность постоянного контроля за изменением концентрации индикатора в воздухе исследуемого объекта. Однако в настоящее время отсутствует совершенная методика ее измерений в областях подвода индикатора и извлечения образцов воздуха для анализа. Кроме того, существуют определенные сложности, связанные с регистрирующей аппаратурой, а также с однозначным ответом на вопрос, каким образом осуществляется исследуемый процесс воздухообмена. Предложенная в настоящей работе методика электроотрицательных маркеров позволяет решить указанные проблемы и может быть применена при исследовании различных технических задач, связанных с движением воздуха и герметизацией пространства.

Идея метода маркирующего газа заключается в анализе изменений концентрации газа, впрыскиваемого в воздух исследуемого помещения. В связи с тем, что этот газ (маркер) не является составной частью воздуха, что отличает его от классического газового метода, предусмотрен и другой по существу способ химического анализа извлекаемых образцов [1]. В классическом газовом методе анализ проводится на основе химической реакции, происходящей в тестовых фильтрах. Метод маркирующего газа основан на использовании резонансного явления захвата электронов электроотрицательными молеку-

лами исследуемых соединений, а также ионизирующих свойств газа. Из общедоступных маркирующих газов выбрана шестифтористая сера ( $SF_6$ ), характеризующаяся низким порогом раскрываемости, безопасностью для окружающей среды, а также термической и химической стойкостью. Это соединение из группы фреонов является сильно электроотрицательным, благодаря чему может быть раскрыто ионизирующим детектором ECD даже при весьма незначительном его содержании в пробе (практически, при концентрации до  $10^{-12}$  г/см<sup>3</sup>). Это значительно увеличивает точность измерения. Существенным является также то, что вследствие высокой степени точности метода является возможным, кроме качественного, также количественное исследование, что при определении, например, коэффициентов инфильтрации имеет решающее значение. Важным преимуществом метода электроотрицательных маркеров является также возможность составления и последующего анализа уравнения массового баланса маркирующего газа, вводимого в пространство исследуемого объекта, что значительно расширяет область исследований.

Анализ изменения концентрации газа, содержащегося в воздухе исследуемого помещения, происходит в хроматографическом наборе, оснащённом детектором ECD. На рис.1 представлена принципиальная схема газового хроматографа. Газ-носитель протекает из баллона через дозирующее оборудование, хроматографическую колонну и детектор. Сигнал детектора для отдельных составляющих пробы записывается на регистраторе в виде характеристических полос (пиков). Роль регистратора может выполнять электронный интегратор или компьютер.

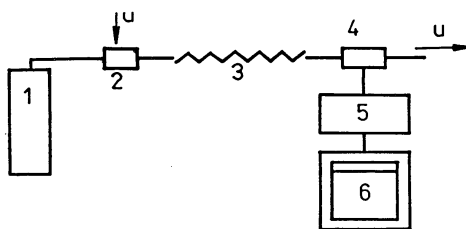


Рис.1 – Схема исследовательской установки с хроматографической системой:  
 1 – баллон с несущим газом; 2 – дозатор; 3 – хроматографическая колонна; 4 – детектор;  
 5 – электрометр; 6 – регистратор,  $u$  – расход газа-носителя

Образец анализируемой газовой смеси, содержащей введенный маркер  $SF_6$ , перед хроматографической колонной вводится в поток несущего газа (чистого азота  $N_2$ ). На движущиеся вместе с не-

сущим газом частицы раскладываемой на составляющие газовой воздушной пробы действуют тормозящие силы, возникающие вследствие поверхностной адсорбции или растворения их в неподвижной фазе. Поочередно появляющиеся в несущем газе на выходе колонны составляющие компоненты анализируемого образца вводятся в детектор, сигнал которого записывается на регистраторе. В период времени с момента введения образца в поток несущего газа до появления составляющего элемента на выходе колонны происходит его идентификация. Площадь под кривой хроматограммы (рис.2) пропорциональна количеству маркирующего газа, содержащегося в воздухе помещения.

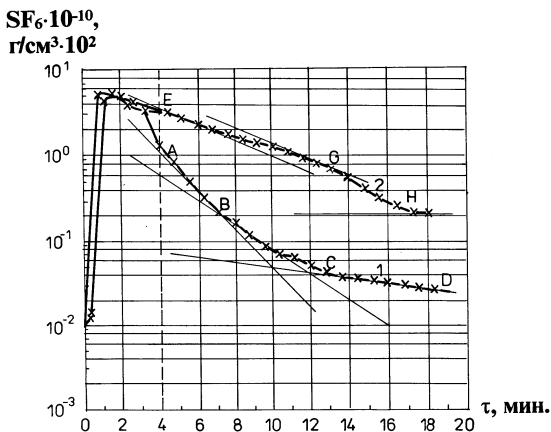


Рис.2 – Зависимость изменения концентрации  $SF_6$  в воздухе исследуемого помещения от времени

Действие детектора ECD основано на использовании явления резонансного захвата электронов электроотрицательными частицами исследуемых соединений, а также на свойствах ионизирующей камеры, работающей в рекомбинационном режиме. Генерированные в несущем газе бета-излучением из радиоактивного источника электроны плывут к электродам детектора под влиянием приложенного к ним электрического напряжения, создавая ионизационный ток детектора. Введенные в детектор вместе с несущим газом составляющие компоненты анализируемого газовой воздушной пробы способствуют уменьшению количества свободных электронов в детекторе вследствие их соединения. Это обуславливает изменение величины ионизационного тока детектора, являющейся мерой количества содержащихся в нем электроотрицательных частиц.

В результате проведенного эксперимента получили кривую  $c_i$  (см. рис.2, кривые 1, 2) в прерывистом виде, являющуюся конечной последовательностью измерительных точек. Для аналитического описания процесса следует подобрать математическую модель объекта. При этом наиболее часто пользуются зависимостью

$$c(\tau) = c(0) \exp^{-t/\tau}, \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация маркирующего газа в начальный момент времени;  $\tau$  – время измерения;  $t$  – временная характеристика, позволяющая проследить скорость изменения концентрации маркера и скорость его поступления в места отбора проб. По величине  $t$  можно установить кратность воздухообмена.

Полученные по результатам исследований уравнения вида (1) являются мгновенными касательными к кривой, характеризующей скорость изменения концентрации индикаторного газа (см. рис. 2). Это позволяет рассчитать средневзвешенное время изменения концентрации маркера в воздухе исследуемого помещения

$$\tau_{cp} = \frac{c_{01}\tau'_1 + c_{02}\tau'_2}{c_{01} + c_{02}}, \quad (2)$$

что дает возможность определить кратность воздухообмена в нем

$$n = 60 / \tau_{cp}, \quad (3)$$

$\tau_{cp}$  выражено в мин, если  $\tau_{cp}$  представлено в с, формула (3) принимает вид

$$n = 1 / (\tau_{cp} \cdot 60). \quad (4)$$

В процессе экспериментальных исследований интенсивности воздухообмена в помещении с привлечением метода маркирующего газа введение маркера  $SF_6$  осуществляли на входе исследуемого помещения импульсным способом путем однократного акта инъекции. При этом было принято предположение, что эта инъекция соответствует quasi d-Disc'у. Для импульсной инъекции изменение концентрации  $c(\tau)$  маркера в зависимости от времени описывается уравнением, являющимся решением математической модели процесса протекания воздуха в виде (1), что позволяет определить кратность воздухообмена по зависимостям (3) или (4).

При использовании метода маркирующего газа чаще всего применяют однократную импульсную инъекцию, выполняемую дозирующим прибором. Количество вводимого маркера зависит от объема исследуемого помещения. При исследовании степени воздухопроницаемости материалов или элементов строительных конструкций дос-

таточно 1...3-х мл SF<sub>6</sub>, при изучении процессов перетекания воздуха в вентиляционных каналах и жилых помещениях – 5 мл, при исследовании процесса воздухообмена в зданиях, а также при установлении путей и степени инфильтрации воздушных потоков – 25...30 мл. Отбор проб воздуха производится в момент, предварительно определенный характером измерения. Чаще всего пробы отбирают на 1-3-й, 5-й и 10-й минутах, а в дальнейшем – каждые 10 минут при условии, что продолжительность эксперимента составляет 1...1,5 часа.

Исследования интенсивности воздухообмена с использованием маркирующего газа проводят в такой последовательности:

- выбирают объект исследований и устанавливают факторы, наиболее сильно влияющие на процесс;
- производят инъекцию маркера;
- с определенным временным интервалом извлекают газозвушные образцы (пробы) из пространства исследуемого помещения;
- производят детекцию газозвушного образца;
- проводят обработку результатов исследования и их интерпретацию.

Эксперимент заканчивают составлением уравнения массового баланса маркирующего газа.

Исследования выполняют в лабораторных и натуральных условиях. В связи с этим детекцию извлеченных газозвушных проб можно проводить непрерывно в лаборатории или непосредственно на объекте исследования с применением специально созданной нами исследовательской установки. Извлеченные образцы предварительно помещают в специальные герметичные контейнеры.

Для избежания значительных ошибок при интерпретации экспериментальных данных, касающихся исследования процесса воздухообмена с использованием маркеров, необходимо составить уравнение массового баланса маркера в месте отбора проб газозвушной смеси. Это уравнение имеет следующий вид:

$$m_w = u \cdot \int_0^{\infty} C(\tau) \cdot d\tau \approx u \cdot \sum_{i=1}^k C_i \cdot \Delta\tau, \quad (5)$$

где  $m$  – масса маркера, содержащегося в воздухе на выходе исследуемого объекта.

Соблюдение равенства  $m_1 = m_w$  указывает на то, что весь введенный на входе помещения маркер поступил на его выход. Если  $m_1 > m_w$ , то существуют неучтенные места утечек воздуха из про-

странства исследуемого помещения.

Метод электроотрицательных маркеров пригоден для любых задач исследования процесса передвижения воздуха, особенно в тех случаях, где первостепенным является количественное определение степени герметичности элемента строительной конструкции, главным образом, окон и дверей. Для определения коэффициента воздухопроницаемости  $a$  указанных элементов является необходимым тщательное уплотнение всех других элементов ограждений исследуемого пространства. Расчет значений  $a$  производят по формуле

$$a = \frac{V \cdot n}{l \cdot \Delta p}, \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{дПа}^{0,7}), \quad (6)$$

где  $V$  – объем исследуемого помещения, м<sup>3</sup>;  $l$  – суммарная длина щелей, через которые осуществляется протекание воздуха, м;  $\Delta p$  – разность давлений по обем сторонам ограждения, дПа.

Нами выполнены исследования процессов протеканий воздуха в пределах квартиры с целью определения интенсивности воздухообмена в ее помещениях и технического состояния вентиляционной системы. Результаты исследований приведены на рис.3 [2]. Эксперимент проводили в помещениях квартиры общей площадью 75 м<sup>2</sup>, размещенной на 3-м этаже 5-этажного здания. Согласно существующей теории протеканий воздуха в здании, эта квартира находится в так называемой нулевой зоне, характеризующейся недостаточной вентиляцией. Исследовали интенсивность воздухообмена не только в помещениях указанной квартиры, но и ее связь с соседними квартирами. При этом нас интересовали следующие вопросы: как происходит воздухообмен в отдельных помещениях одной квартиры, а также, как формируется протекание загрязненного воздуха (запахов, окиси углерода, влаги и т.п.) из помещений одной квартиры в помещения других квартир. Во время проведения эксперимента скорость ветра находилась в пределах  $v = 1,5$  м/с, разность температур воздуха окружающей среды и исследуемой квартиры составляла  $\Delta t = 20$  °С.

Результаты исследований, представленные на рис.4, подтверждают наличие незначительной вытяжной силы вентиляционной системы в ванной комнате (помещение 4, см. рис.3, в) и в туалете (помещение 5). При анализе уравнения массового баланса (5) установлено, что около 60% воздуха из кухни (помещение 1) исследуемой квартиры перетекает в другие помещения квартиры и в помещения других квартир. Из них 10% поступило в ванную комнату через вентиляционный канал, а около 18% сквозь неплотности дверей проникло в комнату

(помещение 2). Особый интерес представляет факт перетекания воздуха из кухни (приблизительно 14%) в комнату (помещение 3), расположенную в плане по одной с ней стороне. Это обстоятельство противоречит принципам вентиляции, согласно которым главное направление протекания воздушного потока обусловлено наличием подветренной стороны или зоны пониженного давления, имеющей место в вентиляционных каналах.

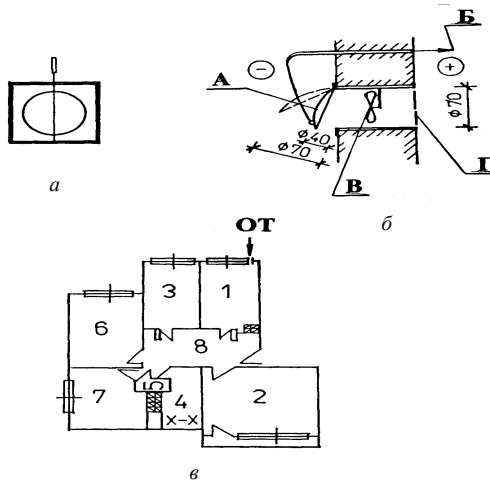


Рис.3 – Схема исследуемой квартиры с приточной вентиляцией, осуществляемой через наружное отверстие:

*a* – профиль приточного отверстия; *б* – поперечный разрез;

*в* – план исследуемой квартиры;

А – регулирующий трос; Б – дроссельная заслонка; В – лопасти вентилятора;

ОТ – размещение приточного отверстия в ограждении квартиры (стрелкой отмечено направление ветра во время эксперимента)

Перетекание воздуха из кухни в комнату 3 обусловлено формированием направленного потока сквозь щели в окнах, коэффициент воздухопроницаемости которых  $a=1,5 \text{ м}^3/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}^{0.7}$ . Образовавшееся разрежение в комнате 3 стало настолько большим, что вызвало засасывание воздуха из кухни.

После проведения экспериментальных исследований процесса воздухообмена в помещениях квартиры и обработки полученных результатов определена кратность воздухообмена, которая составляет:

для туалета  $n=1,2 \text{ ч}^{-1}$ ; для комнат 2 и 3  $n=0,3 \text{ ч}^{-1}$  и  $n=1,0 \text{ ч}^{-1}$ ; для ванной комнаты  $n=0,5 \text{ ч}^{-1}$ .

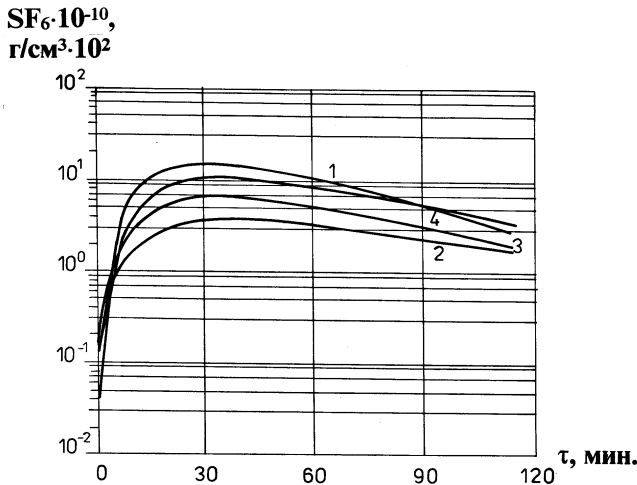


Рис.4 – Изменение концентрации маркирующего газа в помещениях исследуемой квартиры: 1 – туалет; 2 – комната; 3 – ванная комната; 4 – комната

Таким образом, количественное определение величины протекания воздуха с помощью метода маркирующего газа в области квартиры, этажа, здания в целом позволяет выявить необходимость установки дополнительных вентиляционных каналов, отверстий или приточных регуляторов.

Указанный метод обладает высокой точностью, его целесообразно использовать для решения проблем вентиляции и инфильтрации воздуха, герметичности, а также определения интенсивности воздухообмена.

Использование метода маркирующего газа дает возможность подтвердить правильность принятых конструктивно-функциональных решений, связанных с перетеканиями воздушных потоков.

1.Piotrowski J., Faryniak L., The Application of Chromatography Method in the Research into Infiltration Heat Losses. Institute of Heating and Ventilating Warsaw University of Technology, Warsaw, 1994, p. 111 ÷ 114.

2.Piotrowski J., Individual System of Air Intake in Rooms with Tight Partitions. Elsevier, Oxford, 2000, p. 693 - 698.

Получено 04.02.2003