

уровне доверия. Согласно [2] при определении неопределенности ε сопел и труб Вентури полагают, что неопределенности γ , β и отношения перепада к давлению до сужающего устройства равны нулю. В таком случае с учетом (11) неопределенность ε будет выражаться только неопределенностью числа Маха.

Таким образом, сделана попытка найти дополнительные факторы, влияющие на ε газа в сужающих устройствах. Получено более простое уравнение (10), в состав которого входит число Маха, и найдена связь ε с местной скоростью звука до сужающего устройства. Получены объяснения для существующих критериев применимости (1). Исследованы коэффициент ε при различных значениях β и γ , а также возможное влияние числа Маха на коэффициент расширения. Получены выражения для оценки неопределенности коэффициента ε .

Л и т е р а т у р а

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. СПб.: Политехника, 2002.
2. ГОСТ 8.586.1,3,4—2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2003.
4. Стулов В. П. Лекции по газовой динамике. М.: Физматлит, 2004.
5. Плотников В. М., Подрешетников В. А., Тетерева Л. Н. Приборы и средства учета природного газа и конденсата. М.: Недра, 1989.

Дата принятия 12.04.2013 г.

681.121

Измерительная задача идентификации модели объемной воздухопроницаемости оконных и дверных блоков

В. А. ВЛАСОВ*, М. Ю. РОДИН*, С. В. ЧУДОВ**

* РОСТЕСТ-Москва, Москва, Россия, e-mail: info@rostest.ru

** Испытательный центр «ЭКСПЕРИОН», Мытищи, Россия, e-mail: chudov@tbm.ru

Рассмотрена измерительная задача структурно-параметрической идентификации математической модели объемной воздухопроницаемости оконных и дверных блоков. Предложены параметры для ее оценивания.

Ключевые слова: воздухопроницаемость, параметры оценивания, оконные и дверные блоки.

The measuring problem of structural-parametrical identification for mathematical model of air volume penetration for window and door assemblies is considered. The estimation parameters are suggested.

Key words: air penetration, estimation parameters, window and door assemblies.

Контроль качества оконных и дверных блоков, которые находят в последнее время широкое применение, включает исследование их объемной воздухопроницаемости; методы ее определения стандартизованы [1]. В соответствии с [1, п. 3.4.5] класс образца определяют по диаграмме зависимости объемной воздухопроницаемости от перепада давления, построенной в логарифмическом масштабе координат, и расположению линии, полученной по результатам испытаний, относительно нормативных прямых, фиксирующих границы классов (рис. 1). Когда «линия фактических замеров», расположенная в поле какого-либо класса, на локальном участке заходит в поле более низкого класса, испытываемому образцу присваивают номер этого класса воздухопроницаемости (см. [1, п. 3.4.8]). Если следовать изложенному правилу, то присвоение класса нередко становится неоднозначной задачей, так как на практике в большинстве случаев «линия фактических замеров» — графическая характеристика образца — пересекает поля нескольких классов (рис. 2). Дело в том, что характер нормативных границ клас-

сов (вид зависимости объемной воздухопроницаемости Q_1 от перепада давления Δp) не в полной мере отражает физическую картину явления.

В качестве примера рассмотрим нормативную границу класса Б (см. рис. 1):

$$\lg Q = \lg Q_1(10) + \frac{(\lg \Delta p - \lg 10)[\lg Q_1(500) - \lg Q_1(10)]}{\lg 500 - \lg 10},$$

где $Q_1(10) = 1,7 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ и $Q_1(500) = 28,0 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$, тогда $\lg Q = 0,23 + 0,716 (\lg \Delta p - 1,0)$ или $\lg Q = 0,716 \lg \Delta p - 0,486$.

Аналогичный вид имеют уравнения для нормативных прямых, определяющих границы других классов. Если рассматривать границы полей классов как характеристику условных нормативно-контрольных образцов, то можно отметить искусственный характер зависимости воздухопроницаемости от перепада давления.

Поскольку при испытаниях образцов «линии фактических замеров» пересекают нормативные прямые и проходят

через поля различных классов, целесообразно уточнить вид реальной зависимости объемной воздухопроницаемости оконных и дверных блоков от перепада давления.

Постановка задачи. Будем исходить из следующих предположений:

истечение воздуха через неплотности образца (в местах сопряжения створчатого элемента и коробки оконного блока) подобно истечению воздуха через отверстие, площадь которого равна суммарной площади неплотностей образца [2];

суммарная площадь неплотностей — каналов истечения — величина переменная $f_{\Delta p}$, изменяющаяся вследствие деформации створчатого элемента и коробки оконного блока при изменении нагрузки на образец, т. е. при изменении перепада давления Δp .

Тогда уравнение для объемной воздухопроницаемости образца («линии фактических замеров»), выражаемой отношением объемного расхода воздуха к площади поверхности образца, примет вид

$$Q_1 = Af_{\Delta p} \Delta p^{0,5}, \quad (1)$$

а уравнение для переменной суммарной площади неплотностей

$$f_{\Delta p} = f + k\Delta p, \quad (2)$$

где Q_1 — объемная воздухопроницаемость, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; A — комплексный параметр, учитывающий плотность воздуха и коэффициент истечения; f — суммарная площадь каналов истечения воздуха при $\Delta p = 0$, м^2 ; k — условный коэффициент деформации образца как характеристика конструкции, учитывающая ее жесткость и площадь поверхности образца, принимаемый постоянным в зоне упругих деформаций (об упругом характере деформации свидетельствует петля гистерезиса, зафиксированная при испытаниях (см. рис. 2) [3].

С учетом (1), (2) получаем

$$Q_1 = Af(1 + k\Delta p) \Delta p^{0,5} \quad \text{или} \quad Q_1 = F(1 + k\Delta p) \Delta p^{0,5}, \quad (3)$$

где $Af = F$ — эффективная суммарная площадь каналов истечения воздуха при $\Delta p = 0$, характеризующая качество изготовления оконного блока. Поэтому для общего описания зависимости воздухопроницаемости от перепада давления в качестве модели максимальной сложности [4] примем полином степени M переменной $x = \Delta p^{0,5}$:

$$Q_n = \sum_{m=0}^M \theta_m x^m, \quad (4)$$

где индекс n — условный номер модели в зависимости от ее структуры и метода параметрической идентификации.

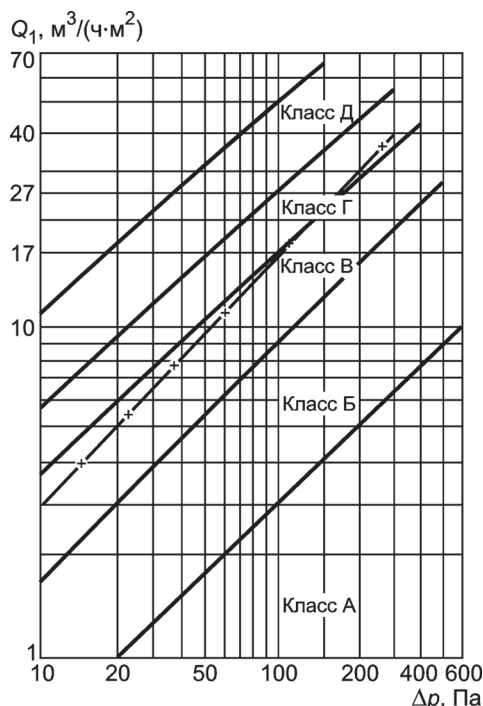


Рис. 1. Диаграмма зависимости объемной воздухопроницаемости Q_1 от перепада давления Δp [1]:

—х— «линия фактических замеров»

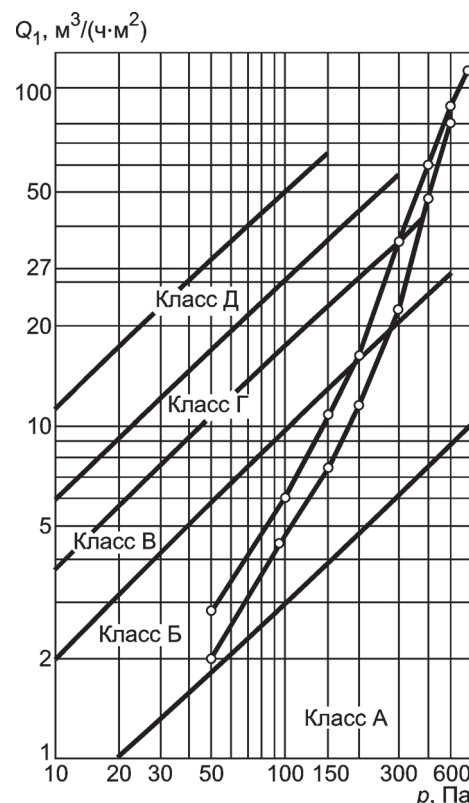


Рис. 2. Результаты испытаний образца оконного блока на испытательном стенде МВ06

Решение задачи идентификации модели воздухопроницаемости. Рассмотрим предварительное решение задачи оценивания параметров модели, построенной из физических соображений, по данным испытаний образца оконного блока на стенде (см. рис. 2), оценим параметры F , k , определяющие Q_1 , а затем воспользуемся общим алгоритмом структурно-параметрической идентификации [4].

В табл. 1 приведены результаты измерений Q_1 в зависимости от перепада давления Δp в режиме повышения нагрузки, а также результаты вычисления величины $F(1 + k\Delta p)$. При этом для параметра Q_1 размерности во второй и третьей колонках разные.

Таблица 1

Исходные данные для оценивания параметра F

Данные протокола испытаний			Результаты вычислений	
Δp , Па	Q_1 , $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$	$Q_1 \cdot 10^3$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\Delta p^{0,5}$, $\text{Па}^{1/2}$	$\Phi(\Delta p) = Q_1 \Delta p^{-0,5} \cdot 10^3$, м^2
50	2,11	0,586	7,071067812	0,08287291476
98	4,57	1,269	9,899494937	0,1281883579
151	7,49	2,081	12,28820573	0,1693493783
199	11,26	3,128	14,10673598	0,2217380409
299	22,36	6,211	17,29161647	0,3591914042
401	47,39	13,164	20,02498439	0,6573787894
496	79,65	22,125	22,27105745	0,9934418268
589	116,58	32,383	24,26932220	1,33431827

Учитывая характер функции $\varphi(\Delta p)$ в начале диапазона перепада давления, путем линейной экстраполяции найдем по ее значениям при $\Delta p = 50; 98$ и 151 Па оценку параметра $F(0)$ при $\Delta p = 0$.

Если использовать интерполяцию в точках $\Delta p = 50$ и 98 Па, то

$$F_1 = 0,0829 \cdot 10^{-3} - 50(0,1282 \cdot 10^{-3} - 0,0829 \cdot 10^{-3}) (98 - 50)^{-1} = 0,0357 \cdot 10^{-3},$$

а в точках $\Delta p = 50$ и 151 Па —

$$F_2 = 0,0829 \cdot 10^{-3} - 50 (0,1693 \cdot 10^{-3} - 0,0829 \cdot 10^{-3}) \times (151 - 50)^{-1} = 0,0401 \cdot 10^{-3}.$$

Теперь примем $F(0) = (F_1 + F_2)/2 = 0,0379 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 37,9 \text{ мм}^2$. Тогда по данным табл. 1 найдем возможные значения коэффициента деформации $k = [\varphi(\Delta p)/F - 1]/\Delta p$ (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для оценивания параметра k

Δp , Па	$1 + k\Delta p$	$k \cdot 10^4$
50	2,19	238
98	3,38	243
151	4,47	230
199	5,85	244
299	9,48	284
401	17,35	408
496	26,2	508
589	35,2	581

Увеличение вычисленных значений коэффициента k для верхней части диапазона перепада давления, вероятно, свидетельствует о том, что при Δp , близких к верхнему пределу, возникает дополнительный источник объемного расхода воздуха, связанный, например, с недостаточной герметичностью из-за монтажных зазоров.

Вычисление среднего значения коэффициента k

проводим для шести ступеней основной части диапазона $50\text{—}400$ Па, что соответствует требованиям [1, п. 3.3.1]: «число ступеней давления при испытаниях должно быть не менее пяти». Среднее значение $k_{\text{ср}}$ определяется из условия наименьшего относительного отклонения от фактически вычисленных значений на границах выбранного диапазона Δp :

$$(k_{\text{ср}} - k_{50})/k_{50} = (k_{401} - k_{\text{ср}})/k_{401};$$

$$k_{\text{ср}} = 2k_{50}k_{401}/(k_{50} + k_{401}) = 0,0301.$$

Согласно (3) расчетная характеристика образца оконного блока

$$Q_{1\text{расч}} = 0,0379 \cdot 10^{-3} (1 + 0,0301\Delta p)\Delta p^{0,5}. \quad (5)$$

В табл. 3 приведены расчетная характеристика образца оконного блока $Q_{1\text{расч}}$, вычисленная по (5), и полученная в результате испытаний $Q_{1\text{исп}}$, а также погрешность $\delta = (Q_{1\text{расч}} - Q_{1\text{исп}})/Q_{1\text{исп}}$.

Таблица 3

Погрешности аппроксимации данных испытаний моделью (5)

Δp , Па	$Q_{1\text{расч}} \cdot 10^3$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$Q_{1\text{исп}} \cdot 10^3$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$Q_{1\text{расч}} - Q_{1\text{исп}} \cdot 10^4$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	δ , %
50	0,671	0,586	0,8532	14,5
98	1,482	1,269	2,129	16,8
151	2,583	2,081	5,015	24,1
199	3,738	3,128	6,091	19,5
299	6,553	6,211	3,425	5,5
401	9,917	13,164	-32,44	-24,6

Воспользуемся программой ММК—СТАТ [4], позволяющей в классе моделей максимальной сложности (4) по критерию минимума среднего модуля погрешности неадекватности (СМПН) путем перебора различных вариантов структуры моделей и методов их параметрической идентификации найти лучшую модель. При этом в качестве методов параметрической идентификации на основе схемы перекрестного наблюдения погрешности неадекватности будем использовать метод наименьших квадратов (ММК—МНК) и метод наименьших модулей (ММК—МНМ), а погрешности аппроксимации данных испытаний моделями будем характеризовать средним модулем погрешности аппроксимации (СМПА). Результаты приведены в табл. 4, при этом модели (5) присвоим условно № 1.

Лучшей по критерию минимума СМПН оказалась модель № 9:

$$Q_{1\text{расч}} = \theta_1 x + \theta_5 x^5.$$

Здесь пятая степень члена оптимальной модели, вероятно, отражает более высокий уровень сложности физической картины явления, связанный с дополнительным источником негерметичности из-за монтажных зазоров нежеле, тот, который описывает модель № 1 выражением (5).

При отсутствии возможности использовать программу ММК—СТАТ параметры воздухопроницаемости образца оконного блока позволяют вычислить следующие формулы интерполяции:

$$\theta_5 = [Q_5 - (x_5 / x_2) Q_2] / (x_5^5 - x_2^4 x_5); \theta_1 = (Q_2 - x_2^5 \theta_5) / x_2.$$

Однако в этом случае вычисленные коэффициенты θ_1 и θ_5 не совпадают с коэффициентами модели № 9:

$$\theta_1 = 10,038597 \cdot 10^{-5}; \theta_5 = 2,8948824 \cdot 10^{-9},$$

а СМПА возрастает до $3,564 \cdot 10^{-4}$. Соответствующую этому случаю модель обозначим № 9*: $Q_1 = 10,038597 \cdot 10^{-5} \Delta p^{0,5} + 2,8948824 \cdot 10^{-9} \Delta p^{2,5}$.

В табл. 5 приведены отклонения экспериментальных данных от расчетных значений для моделей №№ 9; 1 и 9*, а также интервалы D , в которых они расположены. Полученные интервалы должны быть увеличены с учетом погрешностей измерений ΔQ , $\Delta \Delta p$ на основании результатов поверки расходомера и датчика давления в диапазоне измерений, который соответствует рабочему диапазону Δp , а также структуры формул, которые описывают модели №№ 1; 9 и 9* (табл. 6). С учетом данных табл. 5, 6 интервалы D составляют: $-7,8 \cdot 10^{-4} \dots 3,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ для модели № 1; $-8,72 \cdot 10^{-4} \dots 5,72 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ для модели № 9; $-3,63 \cdot 10^{-4} \dots 2,23 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ для модели № 9*.

На рис. 3, построенном в линейном масштабе, изображены экспериментальная и расчетные кривые, а также нормативные кривые для классов Б и В.

Таблица 4

Протокол статистической идентификации модели воздухопроницаемости

Услов- ный номер модели	N	M	Параметры модели при степенях переменных полинома					СМПН	СМПА
			x^0	x^1	x^2	x^3	x^5	$\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	
Алгоритм идентификации — экстраполяция с усреднением									
1	6	3	—	$3,79 \cdot 10^{-5}$	—	$1,14079 \cdot 10^{-6}$	—	$9,332 \cdot 10^{-4}$	$8,295 \cdot 10^{-4}$
Алгоритм идентификации ММК—МНК									
2	6	3	—	—	—	$1,4667913 \cdot 10^{-6}$	—	$8,240 \cdot 10^{-4}$	$7,702 \cdot 10^{-4}$
3	8	3	$-1,0531264 \cdot 10^{-2}$	$3,1719711 \cdot 10^{-3}$	$-2,9599149 \cdot 10^{-4}$	$9,8234532 \cdot 10^{-6}$	—	$1,072 \cdot 10^{-3}$	$1,675 \cdot 10^{-4}$
4	6	5	—	$7,4796510 \cdot 10^{-5}$	—	—	$3,5529981 \cdot 10^{-9}$	$3,127 \cdot 10^{-4}$	$2,099 \cdot 10^{-4}$
5	8	5	$8,3360204 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	$3,7873673 \cdot 10^{-9}$	$2,793 \cdot 10^{-4}$	$2,830 \cdot 10^{-4}$
6	6	3	—	$1,9927727 \cdot 10^{-5}$	—	$1,4037321 \cdot 10^{-6}$	—	$1,037 \cdot 10^{-3}$	$8,479 \cdot 10^{-4}$
Алгоритм идентификации ММК—МНМ									
7	6	3	—	—	—	$1,3078444 \cdot 10^{-6}$	—	$6,965 \cdot 10^{-4}$	$7,059 \cdot 10^{-4}$
8	8	3	—	$3,5863652 \cdot 10^{-4}$	$-6,2125298 \cdot 10^{-5}$	$3,7494865 \cdot 10^{-6}$	—	$2,458 \cdot 10^{-3}$	$1,542 \cdot 10^{-3}$
9	6	5	—	$8,6070308 \cdot 10^{-5}$	—	—	$3,4974752 \cdot 10^{-9}$	$1,855 \cdot 10^{-4}$	$1,880 \cdot 10^{-4}$
10	8	5	$-3,9114945 \cdot 10^{-2}$	$1,1015969 \cdot 10^{-2}$	$-1,0081907 \cdot 10^{-3}$	$3,2697724 \cdot 10^{-5}$	$-8,2539149 \cdot 10^{-9}$	$2,134 \cdot 10^{-4}$	$2,815 \cdot 10^{-4}$
11	6	3	—	$1,5560007 \cdot 10^{-5}$	—	$1,1492689 \cdot 10^{-6}$	—	$8,293 \cdot 10^{-4}$	$7,090 \cdot 10^{-4}$

Таблица 5

Погрешности аппроксимации данных испытаний моделями

Δp , Па	$\xi_{\text{№ 9}} \cdot 10^5$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\xi_{\text{№ 1}} \cdot 10^4$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\xi_{\text{№ 9}^*} \cdot 10^4$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$
50	-8,443619523	-0,8532364252	-1,75011
98	8,442584369	-2,129288513	0,00001
151	4,34159295	-5,014805911	0,36340
199	-4,000363458	-6,091171379	0,94681
299	-68,39990103	-3,424571053	-0,00001
401	17,84420715	3,244488011	1,832146
D	-68,4...17,8	-6,09...32,4	-1,75...18,3

Таблица 6

Характеристики погрешностей измерений

Δp , Па	$\Delta_Q \cdot 10^5$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\Delta_{\Delta p \text{ № 9, 9}^*} \cdot 10^4$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\Delta_{\Delta p \text{ № 1}} \cdot 10^4$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$
50	-3,053(8)	0	0
98	-4,79791(6)	0,128	0,188
151	-6,6595	0,294	0,340
199	5,565	0,548	0,509
299	25,01	-0,478	-0,307
401	-13,8(3)	1,442	0,703
D	-14...25	-0,48...1,44	-0,31 · 10...0,70 · 10 ⁻⁴

Таким образом, для описания качества изделия вместо обобщенного параметра — класса изделия, который определяет только границу полей объемной воздухопроницаемости, предлагается использовать эффективную площадь неплотностей θ_1 или F и коэффициент деформации θ_5 или k с границами погрешности соответствующей модели. Это позволяет создать модельную характеристику образца оконного блока, более точно соответствующую физическим яв-

$Q_1, \text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$

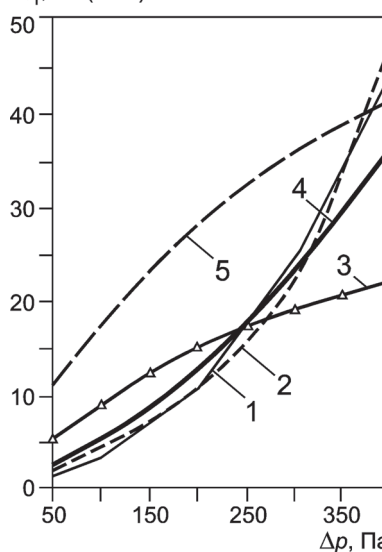


Рис. 3. Зависимости Q_1 (Δp): 1, 4 — расчетные соответственно по ММК СТАТ и (5); 2 — экспериментальная; 3, 5 — нормативные для классов Б и В

лениям в процессе испытаний изделий и, в конечном итоге, гарантировать уровень их качества.

Литература

- ГОСТ 26602.2—99. Блоки оконные и дверные. Методы определения воздухо- и водопроницаемости.
- Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. С. 15—16.
- ГОСТ 8.586.5—2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 5. Методика выполнения измерений.
- Р 50.2.004—2000. ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения.

Дата принятия 23.04.2013 г.