

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Байдаков Д.И., Комарова Л.Ю., Поташников П.Ф.

Московский политехнический университет

Abstract

The indicator characterizing the air permeability of the initial porous structure of the paper material in the absence of external influence on it is proposed

Key words: *paper, fibrous structure, air permeability, pressure gradient, air permeability coefficient*

Известно, что бумага состоит в основном из растительных волокон, упаковка которых неплотная, часть объема занимают воздушные пространства в виде пор и капилляров. Такая структура материала доступна для проникновения воздуха, влаги и жидких составов.

Плотность и пористость материала влияют, а в некоторых случаях определяют механизм закрепления лакокрасочных составов при запечатывании и отделке бумаги. Воздухопроницаемость бумажного материала, под которой понимают его способность пропускать воздух, относят к одному из показателей комплекса свойств, характеризующих структуру бумаги.

В производственном потоке показатель воздухопроницаемости имеет немаловажное значение, когда происходит поочередное штучное передвижение листов бумаги с помощью вакуумных захватов (присосок) в печатных, биговочных и упаковочных процессах. Воздухопроницаемость существенно влияет на скорость заполнения многослойных бумажных пакетов или мешков мелкодисперсными порошками, когда необходимо обеспечить выход воздуха из упаковки.

Сущность методов определения воздухопроницаемости по методам ГОСТов заключается в определении объема воздуха, проходящего через испытываемую площадь образца за определенное время при заданном перепаде давления на образец [1 – 5].

Согласно [1] воздухопроницаемость (P) испытываемого образца бумаги в $\text{мкм}/(\text{Па} \cdot \text{с})$ определяют по формуле:

$$P = \frac{V}{1000 \cdot A \cdot \Delta p \cdot t}, \quad (1)$$

где V – объём воздуха, проходящий сквозь испытуемый образец, см³;
 A – испытуемая площадь, м²;
 Δp – перепад давления, кПа;
 t – продолжительность испытания, с.

Испытания проводят с помощью приборов [1 – 5]: Поттса, Шопера, Бердсена, Шеффилда, Герли. Различные типы приборов существенно отличаются друг от друга, например, измерительной головкой, перепадом давления и т.п. Поэтому в протоколе испытаний всегда указывается тип применяемого прибора.

Объективность результатов по оценке воздухопроницаемости бумаг, производимой по стандартным методам [1 – 6], вызывает сомнения.

Во-первых, разработчики стандартных методов признают, что значения воздухопроницаемости, рассчитанные по формуле (1), содержащей величины, измеренные приборами различных типов, не равнозначны [1].

Во-вторых, в формуле (1) нет учета толщины образца, что делает невозможной оценку влияния на воздухопроницаемость градиента давления, представляющего собой движущую силу проницаемости.

В-третьих, согласно [6] условия испытаний (перепад давления) подбирают под свойства бумаг, вместо того, чтобы оценивать их свойства в равных условиях и иметь возможность производить сравнительную оценку воздухопроницаемости разных бумаг.

Выполненные авторами исследования имели целью устранение отмеченных недостатков в определении воздухопроницаемости бумаг и поиск параметров для сравнительной оценки первоначальной структуры бумаг при отсутствии градиента давления.

Количество воздуха, проникшего сквозь бумагу, можно описать уравнением:

$$Q = -k \cdot \frac{\Delta p}{\delta} \cdot S \cdot t = -k \cdot \frac{(p_{за} - p_{до})}{\delta} \cdot S \cdot t, \quad (2)$$

где k – коэффициент воздухопроницаемости, м²/(Па·с);
 Δp – перепад давления (разность давлений за бумагой $p_{за}$ и до бумаги $p_{до}$), Па;
 δ – толщина бумаги, м;

S – площадь образца, м²;
 t – время проникания, с;

Абсолютное давление воздуха с одной стороны испытываемого образца обычно равно атмосферному. В этом случае получаем:

$$Q = k \cdot \frac{(p_{атм} - p_{за})}{\delta} \cdot S \cdot t = k \cdot \frac{\Delta p_{разр}}{\delta} \cdot S \cdot t, \quad (3)$$

где $\Delta p_{разр}$ – созданное разрежение, Па.

При этом расход воздуха сквозь бумажный материал W будет равен:
 $W = Q / t$.

Введем понятие «плотность воздушного потока»:

$$Q = k \cdot \frac{(p_{атм} - p_{за})}{\delta} \cdot S \cdot t = k \cdot \frac{\Delta p_{разр}}{\delta} \cdot S \cdot t. \quad (4)$$

Таким образом, количество воздуха, проникшего сквозь бумагу, будет пропорционально градиенту разрежения.

Прямо пропорциональная зависимость плотности потока от градиента разрежения (4) – это частный случай общей зависимости:

$$q = k \cdot (\text{grad } P_{разр})^n. \quad (5)$$

По физическому смыслу коэффициент пропорциональности k в уравнении (5) представляет собой скорость роста функции в начале изменения аргумента и равен тангенсу угла наклона касательной в начале функциональной зависимости (зависимости q от $\text{grad } P_{разр}$). Значение k при $\text{grad } P_{разр} = 0$ целесообразно назвать «начальным коэффициентом воздухопроницаемости» и обозначить k_0 . Тогда уравнение (5) можно представить в виде:

$$q = k_0 \cdot (\text{grad } P_{разр})^n. \quad (6)$$

Коэффициент воздухопроницаемости бумаги зависит от её структуры и свойств. Начальный коэффициент проницаемости k_0 характеризует начальную (исходную) структуру бумаги, не подверженной

внешнему воздействию. По коэффициенту k_0 можно сравнивать бумаги с различной начальной структурой. Изменение коэффициента воздухопроницаемости при возрастании разрежения будет отражать происходящие при этом структурные изменения в бумаге.

Первая производная уравнения (6) описывает скорость изменения плотности воздухопотока при возрастании градиента разрежения, а также зависимость текущего коэффициента воздухопроницаемости от градиента разрежения:

$$\frac{dq}{d \text{grad } P_{\text{разр}}} = n \cdot k_0 \cdot (\text{grad } P_{\text{разр}})^{n-1}, \quad (7)$$

$$k_{\text{grad } P_{\text{разр}}} = n \cdot k_0 \cdot (\text{grad } P_{\text{разр}})^{n-1}. \quad (8)$$

Уравнение (8) описывает изменение коэффициента проницаемости при увеличении разрежения, а в физическом смысле – изменение структуры бумаги при воздействии на неё давления. Коэффициент воздухопроницаемости можно рассматривать как структурочувствительный показатель.

Значения $k_{\text{grad } P_{\text{разр}}}$ при увеличении $\text{grad } P_{\text{разр}}$ будут: неизменными при $n = 1$, увеличиваться при $n > 1$ и уменьшаться при $n < 1$.

Физический смысл показателя степени в формуле (6) становится понятным, если градиенту разрежения придать единичное значение.

При $\text{grad } P_{\text{разр}} = 1$ получаем:

$$n = k_{\text{grad } P_{\text{разр}}=1} / k_0, \quad (9)$$

т.е. показатель степени n – это кратность изменения начального коэффициента воздухопроницаемости при единичном градиенте разрежения.

Таким образом, представляет практический интерес экспериментальное изучение зависимости коэффициента проницаемости бумаги от градиента разрежения, когда значения градиента изменяются в широком интервале.

Для этих целей авторами была специально разработана установка, позволяющая создавать перепад давления по разные стороны бумаги $\Delta P_{\text{разр}}$ в интервале от 0 до 10 кПа, а также изменять его по ходу опыта. Перепад давления воздуха создают с помощью водного аспиратора зам-

кнутого цикла. Расход воздуха сквозь образец фиксируют с помощью реометров. Образцы бумажного материала закрепляют специальными адаптерами с разной площадью проходного сечения.

Зависимости воздухопроницаемости от градиента разрежения изучены для бумаги, характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследованных бумаг

Образец	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²	Плотность, г/см ³
Офсетная бумага-55	0,0538	55	0,83
LORD DIGITAL- 90	0,0860	90	0,97
LORD DIGITAL-160	0,1592	160	0,99
LORD DIGITAL-220	0,2308	220	0,95

Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Экспериментальные данные по оценке воздухопроницаемости бумаг

Бумага	$\Delta P_{разр}$, кПа	W , см ³ /мин	q , см/мин	$\frac{grad P_{разр}}{P_{разр}}$, кПа/см	k_0 , см ² / (кПа·мин)	n	R
LORD DIGITAL-220	0,53	314,9	16,1	23,0	0,79	0,95	0,996
	1,03	550,9	28,1	44,8			
	1,49	816,4	41,7	64,8			
	1,80	1022,9	52,2	78,3			
LORD DIGITAL- 160	0,44	314,9	16,1	27,7	0,76	0,91	0,993
	1,04	639,4	32,6	65,4			
	1,23	786,9	40,1	77,6			
	1,55	1022,9	52,2	97,5			
LORD DIGITAL-90	0,44	314,9	16,1	50,9	0,38	0,95	0,999
	1,00	668,9	34,1	116,3			
	1,24	845,9	43,2	144,7			
	1,49	1022,9	52,2	173,1			
Офсетная бумага-55	0,60	314,9	16,1	111,1	0,16	0,97	0,994
	1,05	491,9	25,1	194,4			
	1,52	727,9	37,1	281,5			
	2,01	1022,9	52,2	372,2			

Для каждой бумаги получено не менее 25 взаимосвязанных значений $\Delta P_{разр}$ и W . Из-за ограничений, наложенных на объем публикации, в табл. 2 приведены только 4 значения этих величин. По экспериментальным данным рассчитаны уравнения парной регрессии, соответствующие формуле (6), а также значения коэффициента корреляции R для каждой бумаги. Численные значения параметров k_0 и n уравнений парной регрессии представлены в табл. 2.

Показатель степени n для исследованных бумаг имеет значения меньше единицы. Следовательно, с увеличением градиента разрежения коэффициент воздухопроницаемости бумаг уменьшается. Последнее обстоятельство связано с увеличением плотности бумаги с возрастанием действующего на неё давления, что характерно для материалов со свойствами ауксетиков [7], к которым в настоящее время относят бумагу.

Полученные значения k_0 не находятся в корреляционной зависимости от плотности бумаги. Таким образом, плотность бумаги не может служить её структурочувствительным показателем. Действительно, бумаги, содержащие наполнитель разной плотности, но с одинаковыми размерами частиц и одинаковой физико-химической и термодинамической совместимостью с волокнами, будут отличаться по плотности, имея подобную структуру и равную воздухопроницаемость.

В результате выполненных исследований воздухопроницаемость бумажных материалов предлагается характеризовать начальным коэффициентом воздухопроницаемости, представляющим собой коэффициент пропорциональности в начале зависимости плотности воздушного потока сквозь бумагу от градиента создаваемого разрежения. Предложенный показатель, равный тангенсу угла наклона касательной в начале упомянутой зависимости, может рассматриваться как структурочувствительный показатель, отражающий начальную структуру бумажного материала.

Дальнейшие работы целесообразно направить на установление корреляционной связи между начальным коэффициентом воздухопроницаемости и пористостью бумаги.

Литература

1. ГОСТ 30114-95 (ИСО 5636-1-84). Межгосударственный стандарт. Бумага и картон. Определение воздухопроницаемости (средний диапазон). Общие требования к методам: [Электронный ресурс]. Сайт «База ГОСТов». Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data/90/9045.pdf>, свободный.
2. ISO 5636-2:1984. Бумага и картон. Определение воздухопроницаемости (средний диапазон измерения). Часть 2. Метод Шоппера: [Электронный ресурс]. Сайт: «StandartGOST.ru - [бесплатные ГОСТы и магазин документов](http://StandartGOST.ru)». Режим доступа: https://standartgost.ru/g/ISO_5636-2:1984, платный.
3. ISO 5636-3:2013. Бумага и картон. Определение воздухопроницаемости (средний диапазон измерения). Часть 3. Метод Бендстена: [Электронный ресурс]. Сайт: «StandartGOST.ru - [бесплатные ГОСТы и магазин документов](http://StandartGOST.ru)». Режим доступа: https://standartgost.ru/g/ISO_5636-3:2013, платный.
4. ISO 5636-4:2005. Бумага и картон. Определение воздухопроницаемости (средний диапазон измерения). Часть 4. Метод Шеффилда: [Электронный ресурс]. Сайт: «StandartGOST.ru - [бесплатные ГОСТы и магазин документов](http://StandartGOST.ru)». Режим доступа: https://standartgost.ru/g/ISO_5636-4:2005, платный.
5. ISO 5636-5:2003. Бумага и картон. Определение воздухопроницаемости и сопротивления воздуха (средний диапазон измерения). Часть 5. Метод Герли: [Электронный ресурс]. Сайт: «StandartGOST.ru - [бесплатные ГОСТы и магазин документов](http://StandartGOST.ru)». Режим доступа: https://standartgost.ru/g/ISO_5636-5:2003, платный.
6. ГОСТ 13525.14-77 Бумага и картон. Метод определения воздухопроницаемости (с Изменениями N 1, 2, 3). Москва. Стандартинформ, 2007: [Электронный ресурс]. Сайт: «АО «[Кодекс](http://docs.cntd.ru)». Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации». Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200018458>, свободный.
7. Берлин А., Ротенбург Л., Басэрст Р. Структура изотропных материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона. Высокомолекулярные соединения, Том 33, Номер 8, 1991. Режим доступа: http://polymsci.ru/static/Archive/1991/VMS_1991_T33ks_8/VMS_1991_T33ks_8_619-621.pdf, свободный.