

Получено: 11.08.2022 г. | Принято: 17.08.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.5.308.318>

Научная статья

ПОРТАТИВНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПАРПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.О.Роечко (Дудник)¹, ст. преп., ORCID: 0000-0001-7425-591X

Г.А.Армеев², к.ф.-м.н., вед. науч. сотр., ORCID: 0000-0001-9223-7010

Е.С.Трофимчук², к.х.н., науч. сотр., ст. преп., ORCID: 0000-0002-8035-7872

И.В.Яминский², д.ф.-м.н., проф., физический и химический факультеты, генеральный директор Центра перспективных технологий, директор Энергоэффективных технологий, ORCID: 0000-0001-8731-3947 / yaminsky@nanoscopy.ru

Аннотация. Разработано портативное устройство для качественного экспресс-измерения паропроницаемости пленочных материалов. В статье приводится описание конструктивных и электротехнических особенностей устройства, предложен универсальный метод измерения паропроницаемости с помощью разработанного устройства. Функционал ячейки показан на примере пленок полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), деформированных в сверхкритическом диоксиде углерода (СК-СО₂) до различных степеней деформации. В статье приводится ряд прямых экспериментальных данных (относительная влажность в единицах RH%, температура в °C), а также результат перенормировки относительной влажности в единицы абсолютной влажности (давления/плотности пара) для использования в качестве количественной характеристики.

Ключевые слова: паропроницаемость, пленочные материалы, пористые пленки, полиэтилен высокой плотности, сверхкритический диоксид углерода

Для цитирования: А.О. Роечко (Дудник), Г.А. Армеев, Е.С. Трофимчук, И.В. Яминский. Портативная ячейка для качественной оценки паропроницаемости пленочных материалов. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 5. С. 308-318. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.5.308.318>

Received: 11.08.2022 | Accepted: 17.08.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.5.308.318>

Original paper

PORTABLE CELL FOR QUALITATIVE ASSESSMENT OF VAPOR PERMEABILITY OF FILM MATERIALS

A.O.Roenko (Dudnik)¹, Senior Lecturer, ORCID: 0000-0001-7425-591X

G.A.Armeev², Cand. of Sci. (Biology), Leading Researcher, Biological department, ORCID: 0000-0001-9223-7010

E.S.Trofimchuk², Cand. of Sci. (Chemistry), Researcher, Senior Lecturer, Chemical department, ORCID: 0000-0002-8035-7872

I.V.Yaminsky², Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof. of Lomonosov Moscow State University, Physical and Chemical departments, Director of Advanced Technologies Center, Director of Energy Efficient Technologies, ORCID: 0000-0001-8731-3947 / yaminsky@nanoscopy.ru

¹ Государственный университет "Дубна", Институт системного анализа и управления / Dubna State University, Institute of System Analysis and Management
² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова / Lomonosov Moscow State University



Abstract. A portable device for high-quality express measurement of vapor permeability of film materials has been developed. The paper describes in detail the design and electrical features of the device, as well as a universal method of qualitative measurement of vapor permeability. The functional of the cell is shown by the example of HDPE films deformed in supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) to various tensile strain. The article presents a number of direct experimental data (relative humidity in RH%, temperature in Celsius degrees), as well as the result of renormalization of relative humidity into absolute humidity units (vapor pressure/density) for use as a quantitative characteristic.

Keywords: vapor permeability, film materials, porous films, high density polyethylene, supercritical carbon dioxide

For citation: A.O. Roenko (Dudnik), G.A. Armeev, E.S. Trofimchuk, I.V. Yaminsky. Portable cell for qualitative assessment of vapor permeability of film materials. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 5. PP. 308–318. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.5.308.318>

ВВЕДЕНИЕ

Пористые полимерные материалы нашли широкое применение в нашей повседневной жизни. Они используются в качестве "дышащих" компонентов для спортивной одежды и обуви [1]; мембран для разделения жидкостей и газов [2]; медицинских повязок с включенными лекарствами или наночастицами серебра [3] и т.д. Некоторые пористые полимерные пленки позволяют небольшим молекулам жидкости или газа мигрировать через их поверхность. В этом случае можно говорить о паро- или газопроницаемости материалов.

К настоящему времени разработан ряд стандартных методик для характеристики паропроницаемости на примере материалов для спортивной одежды.

Обычно при испытаниях пористых материалов на паропроницаемость используется величина WVTR (water vapor transmission rate) – скорость диффузии, которая имеет размерность г/(м²·24 ч). Для ее определения существует множество методик (американский тест с вертикально стоящей чашей ASTM E 96 [4], перевёрнутой чашей ASTM E BW, японский тест с вертикально стоящей чашкой и сухим влагопоглотителем (A1) JIS L 1099 A1 и др. [5]). Почти все они основаны на измерении зависимости массы вещества от времени. Однако существенным недостатком данных методик является измерение величины WVTR при разных условиях (таких как сила ветра, температура, влажность окружающей среды и т.д.). Рассчитанная таким образом скорость диффузии WVTR не является полностью объективной. Зачастую производители проводят ряд стандартных испытаний, в результате чего выбирают наилучшие показатели WVTR, что совершенно не гарантирует их объективность [5]. Поэтому невозможно

INTRODUCTION

Porous polymeric materials have found wide application in our everyday life. They are used as breathable components for sportswear and footwear [1]; membranes for separation of liquids and gases [2]; medical dressings with incorporated medication or silver nanoparticles [3], etc. Some porous polymer films allow small molecules of liquid or gas to migrate across their surface. In this case we can speak of vapour- or gas-permeable materials.

To date, a number of standard methodologies have been developed to characterise vapour permeability, using sportswear materials as an example.

The water vapour transmission rate (WVTR), which is a diffusion rate measured in g/(m²·24 h), is commonly used in tests of porous materials for water vapour permeability. There are various methods for its determination (American vertical cup test ASTM E 96 [4], inverted cup test ASTM E BW, Japanese vertical cup test with dry desiccant (A1) JIS L 1099 A1 and others) [5]). Almost all of them are based on measuring the mass dependence of the substance on time. However, a significant drawback of these techniques is measurement of the WVTR under different conditions (such as wind strength, temperature, ambient humidity, etc.). The WVTR calculated in this way is not completely objective. Often manufacturers carry out a series of standard tests, resulting in the best WVTR, which does not guarantee objectivity at all [5]. Therefore, it is not possible to objectively compare WVTR values for fabrics from different manufacturers due to the use of different techniques.

The method proposed in this paper is based on a qualitative measurement of vapour permeability using a special HYT 939 capacitive sensor, which is synchronised with an Arduino Nano board to automatically record the data obtained in Excel program. The measurement result presents the qualitative vapour permeability (above the film) in units

объективно сравнить показатели WVTR для тканей различных производителей в силу использования разных методик.

Предложенный в данной работе метод исследования полимерных пористых мембран основан на качественном измерении паропрооницаемости с помощью специального емкостного датчика НУТ 939, который синхронизирован с платой Arduino Nano для автоматической записи полученных данных в программу Excel. Результат измерений – качественная паропрооницаемость (над пленкой) в единицах относительной влажности RH%, пересчитанная впоследствии в абсолютную с использованием табличных значений, а также установившаяся температура (°C) в ячейке.

В данной работе приводится демонстрация функционирования ячейки на примере пористых полимерных пленок ПЭВП. Данные пленки получены в результате одноосной деформации в сверхкритическом диоксиде углерода. Полученные пленки являются гидрофобными, они не набухают и не пропускают через себя воду.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Было разработано устройство для измерения паропрооницаемости полимерных пористых пленок (рис.1). Функционал ячейки продемонстрирован на примере пленок ПЭВП ($M_w = 200$ кДа, $T_{melt} = 130$ °C, степень кристалличности 70%, толщина 75 мкм), предварительно одноосно деформированных в сверхкритическом диоксиде углерода (СК- CO_2) при 10 МПа и 35 °C до различных степеней деформации. Полученные пористые пленки характеризовали величиной эффективной объемной пористости, которую определяли как отношение приращения объема образцов в процессе растяжения к конечному объему:

$$W = \frac{V - V_0}{V} \times 100\%, \quad (1)$$

где W – объемная пористость; V_0 – начальный и V – конечный (после растяжения) объем образца.

Исходно для измерения паропрооницаемости было разработано специальное устройство № 1 [6], которое в дальнейшем было доработано и улучшено в результате проведения ряда экспериментов до устройства № 2 (рис.1 а-д, справа). Габаритные размеры ячейки $90 \times 70 \times 80$ мм³.

Ячейка для измерения паропрооницаемости состоит из следующих компонентов: емкость для жидкости (1), держатель (сменный блок) для зажимов с пленкой (2), крышка (3) с внутренним ограничителем датчика (4) для сбора

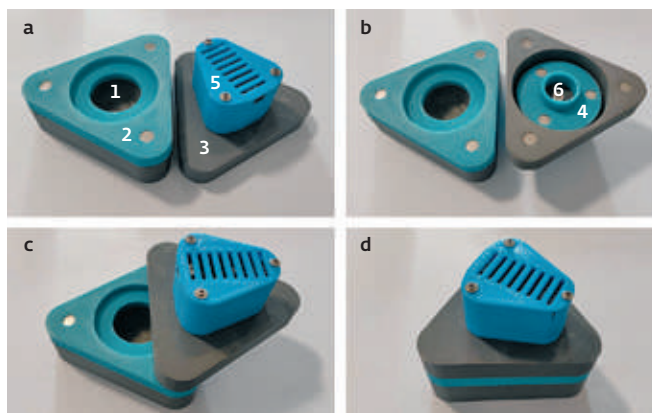


Рис.1. Устройство № 2 для измерения паропрооницаемости: а, б – в разобранном виде; с и d – в сборке. Компоненты ячейки № 2 по рис. а и б: 1 – емкость для жидкости; 2 – держатель для пленки; 3 – крышка ячейки; 4 – внутренний ограничитель; 5 – плата Arduino Nano в корпусе; 6 – датчик НУТ 939

Fig.1. Vapour permeability measuring device No. 2: a, b – disassembled, c and d – assembled. Components of cell No. 2 according to Figs. a and b: 1 – liquid reservoir; 2 – film holder; 3 – cell cover; 4 – internal limiter; 5 – Arduino Nano board in housing; 6 – НУТ 939 sensor

of relative humidity RH%, subsequently converted to absolute using table values, and the steady-state temperature (°C) in a cell.

In this paper a demonstration of cell operation is given using porous HDPE polymer films as an example. These films are obtained by uniaxial deformation in supercritical carbon dioxide. The obtained films are hydrophobic and do not swell or permeate water.

EXPERIMENT

A device has been developed to measure vapour permeability of polymer porous films (Fig.1). The function of the cell was demonstrated by means of HDPE films ($M_w = 200$ kDa, $T_{melt} = 130$ °C, degree of crystallinity 70%, thickness 75 μ m) that were preliminary uniaxially deformed in supercritical carbon dioxide (SC- CO_2) at 10 MPa and 35 °C to different tensile strain. The obtained porous films were characterized by the value of effective volume porosity, which was defined as the ratio of incremental volume of the samples in the process of stretching to the final volume:

$$W = \frac{V - V_0}{V} \times 100\%, \quad (1)$$

where W is the volumetric porosity, V_0 is the initial and V is the final (after stretching) volume of the sample.

показаний относительной влажности и температуры с одинаковой площади образца, а также основной электронный компонент – плата Arduino Nano (5) в защитном корпусе с настроенным датчиком относительной влажности и температуры HYT 939 (6).

Все конструктивные элементы изготовлены на 3D-принтере Maker Bot Replicator 2X из ABS-пластика. Слои ячейки соединены магнитами, которые зашиты в ее углах. Полная стыковка поверхностей обеспечена тщательной обработкой поверхностей с помощью наждачной бумаги.

Максимальный объем емкости для жидкости составляет 8 мл (рабочий объем – 5 мл). Внутренняя поверхность (стенки и дно) покрыта тонким слоем водонепроницаемого парафина.

Площадь ограничителя (4) по периметру датчика составляет 3,14 см². Для данного устройства был выбран датчик относительной влажности и температуры HYT 939 в металлическом корпусе с защитным фильтром от брызг жидкости и химических реагентов с внешним диаметром 9 мм.

Разработанная ячейка имеет следующие особенности:

1. **Многослойность.** Это дает возможность разрабатывать и проектировать новые сменные блоки (2) для зажимов с пленками, форма которых может варьироваться, без существенных изменений общей конструкции ячейки.
2. **Форма.** Треугольная форма и магниты позволяют частично "открывать" ячейку, что дает возможность производить замену жидкости без полного снятия всех слоев конструкции (рис.1с), а также производить быструю замену образца.
3. **Конструкция электронных компонент.** Плата Arduino Nano и датчик HYT 939 разнесены на расстояние порядка 2-3 см, что исключает возможный нагрев датчика от работающей продолжительное время платы. Решетка корпуса не позволяет перегреваться работающим электронным компонентам. Внутренняя архитектура верхнего корпуса исключает утечку паров жидкости.
4. **Портативность.** Данную ячейку легко и безопасно транспортировать, все электронные компоненты защищены внешним корпусом.

Ниже (рис.2) приведено схематичное изображение ячейки с жидкостью и пленкой в разрезе, а также технические характеристики датчика. Пленку располагали в ячейке таким образом, чтобы она не соприкасалась вплотную с поверхностью жидкости и датчика (на

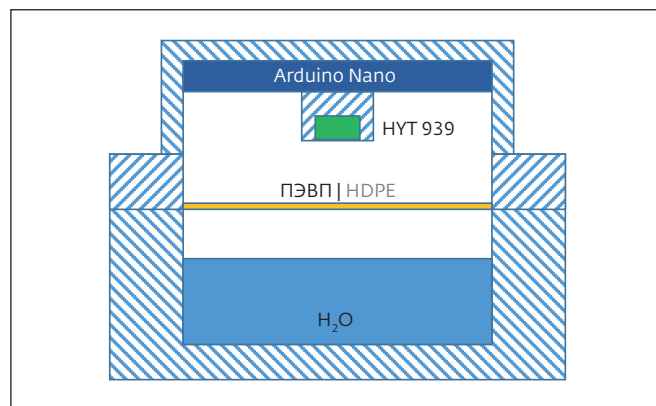


Рис.2. Схематичное изображение ячейки с пленкой ПЭВП, водой и электронными компонентами

Fig.2. Schematic representation of a cell with HDPE film, water and electronic components

Initially, a special device No. 1 [6] was developed to measure vapour permeability, which was further developed and improved through a series of experiments to obtain device No. 2 (Fig.1 a-d, right). The overall dimensions of the cell are 90×70×80 mm³.

The vapour permeability measurement cell consists of the following components: container for liquid (1), holder (exchangeable unit) for the film clamps (2), cover (3) with internal sensor limiter (4) to collect relative humidity and temperature readings from the same sample area, and the main electronic component – an Arduino Nano board (5) in a protective housing with the preset HYT 939 relative humidity and temperature sensor (6).

All structural elements are made by the Maker Bot Replicator 2X 3D printer from ABS plastic. The layers of the cell are connected by magnets that are embedded into its corners. Complete abutment of the surfaces is ensured by a careful surface finish with sandpaper.

The maximum volume of the liquid container is 8 ml (working volume is 5 ml). The inner surface (walls and bottom) is coated with a thin layer of waterproof paraffin.

The limiter area (4) around the perimeter of the sensor is 3.14 cm². For this unit, the relative humidity and temperature sensor HYT 939 in a metal casing with a splash-proof filter for liquid and chemical agents with an outer diameter of 9 mm was selected.

The developed cell has the following features:

1. **Multilayering.** It makes it possible to develop and design new interchangeable units (2) for film clamps whose shape can be varied, without significant changes to the overall cell design.
2. **Shape.** The triangular shape and magnets allow the cell to be partially "opened", making it possible



Таблица 1. Технические характеристики датчика НУТ 939

Table 1. НУТ 939 technical characteristics

	Относительная влажность, RH% Relative humidity	Температура, °C Temperature
Диапазон измерений Measuring range	От 0 до 100% RH	От -40 до +125 °C From 40 to +125 °C
Точность Accuracy	±1,8 (в диапазоне 0...80% RH) (in a range of 0...80% RH)	±0,2 °C (в диапазоне 0...60 °C) (in a range of 0...60 °C)
Время отклика Response time	<10 с s	<10 с s
Повторяемость Repeatability	±0,2% RH	±0,1 °C
Дрейф характеристик Drift of characteristics	<±0,5% RH/год RH/y	±0,05 °C/год °C/y

расстоянии 1–2 см). Используемый датчик НУТ 939 обладает хорошими техническими характеристиками: высокая точность, короткое время отклика, повторяемость результатов и т.д., а также минимальным дрейфом указанных величин (табл.1).

Для записи и передачи экспериментальных значений температуры и относительной влажности с датчика на персональный компьютер был использован готовый макрос для Excel – PLX-DAQ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Работа прибора была продемонстрирована на примере пористых полимерных пленок ПЭВП, деформированных до различных степеней в СК-СО₂. Методику получения образцов можно найти в работах [6, 7], в которых показано, что в этих условиях в полимерной пленке формируется открыто-пористая структура, содержащая анизотропные поры размером 20–30 нм в ширину и до 200 нм в длину.

Были получены данные температуры (°C) и относительной влажности (RH, %) от времени для следующих систем: пустая ячейка; ячейка с водой; ячейка с водой и пленками со степенью деформации 0%, 75%, 140%, 185%, 200% и 400%. Все тестируемые пленки фиксировались в держателе таким образом, что с одной стороны располагалась ячейка с водой, с другой – датчик. В качестве экспериментальной жидкости была выбрана дистиллированная вода объемом 5 мл. Площадь поверхности, с которой считывалась информация, составляла 3,14 см². Данная величина площади

to replace the fluid without completely removing all layers of the design (Fig.1. c), and to make quick changes to the sample.

3. **Design of the electronic components.** The Arduino Nano board and the НУТ 939 sensor are separated by about 2–3 cm, which prevents the sensor from heating up when the board is in operation for a long time. The enclosure grid prevents overheating of the operating electronic components. The internal architecture of the upper casing prevents leakage of liquid vapour.

4. **Portability.** This cell is easy and safe to transport, with all electronic components protected by an outer casing.

Below (Fig.2) is a schematic cross-sectional view of the liquid-film cell and the sensor specifications. The film was placed in the cell in such a way that it was not in close contact with the surface of the liquid and the sensor (at a distance of 1–2 cm). The applied НУТ 939 sensor has good technical characteristics: high accuracy, short response time, repeatability, etc., as well as the minimal drift of the indicated values (Table 1).

A ready-made Excel macro, PLX-DAQ, was used to record and transmit the experimental temperature and relative humidity values from the sensor to a personal computer.

RESULTS AND DISCUSSION

Operation of the device was demonstrated with the use of porous HDPE polymer films deformed to tensile strain in СК-СО₂. The technique for obtaining samples can be found in papers [6, 7] which show that under these conditions an open-porous

следует из размеров ограничителя 4, располагающегося по периметру вокруг датчика (рис.1b).

На рис.3 представлен график зависимости относительной влажности-температуры от времени для пустой ячейки. В закрытой ячейке при отсутствии жидкости и пленок данные величины стремятся к постоянному значению.

Температура в течение всех экспериментов варьировалась незначительно. Тем не менее, при замене образца данные подвергались небольшому дрейфу (рис.4а), чем вызван разброс начальных значений. Итоговая температура выходит на плато спустя 2400–3000 с после начала эксперимента (40–50 мин). Среднее значение температуры составляет $\langle T \rangle = 27,0 \pm 0,5$ °C, что согласуется со средней температурой окружающей среды, при которой проводились измерения. Погрешность температуры рассчитывалась по участку графика на плато. Это составляет примерно 1000 измерений. Аналогично значение относительной влажности для указанных систем (пустая ячейка, ячейка с водой, ячейка с водой и пленками со степенью деформации в диапазоне от 0 до 400%) выходит на плато спустя 40–50 мин (рис.4б).

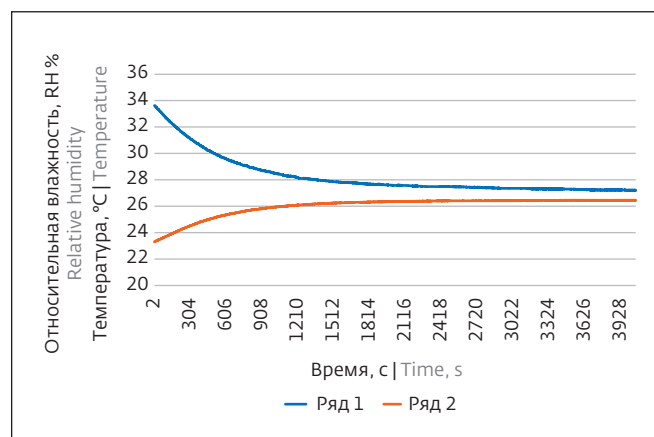


Рис.3. График зависимости относительной влажности RH% (синяя линия) и температуры T, °C (красная линия) от времени для пустой ячейки

Fig.3. Plot of relative humidity RH % (blue line) and temperature T, °C (red line) versus time for an empty cell

structure is formed in the polymer film, containing anisotropic pores 20–30 nm in width and up to 200 nm in length.

Temperature (°C) and relative humidity (RH, %) data versus time were obtained for the following systems: empty cell; cell with water; cell with water

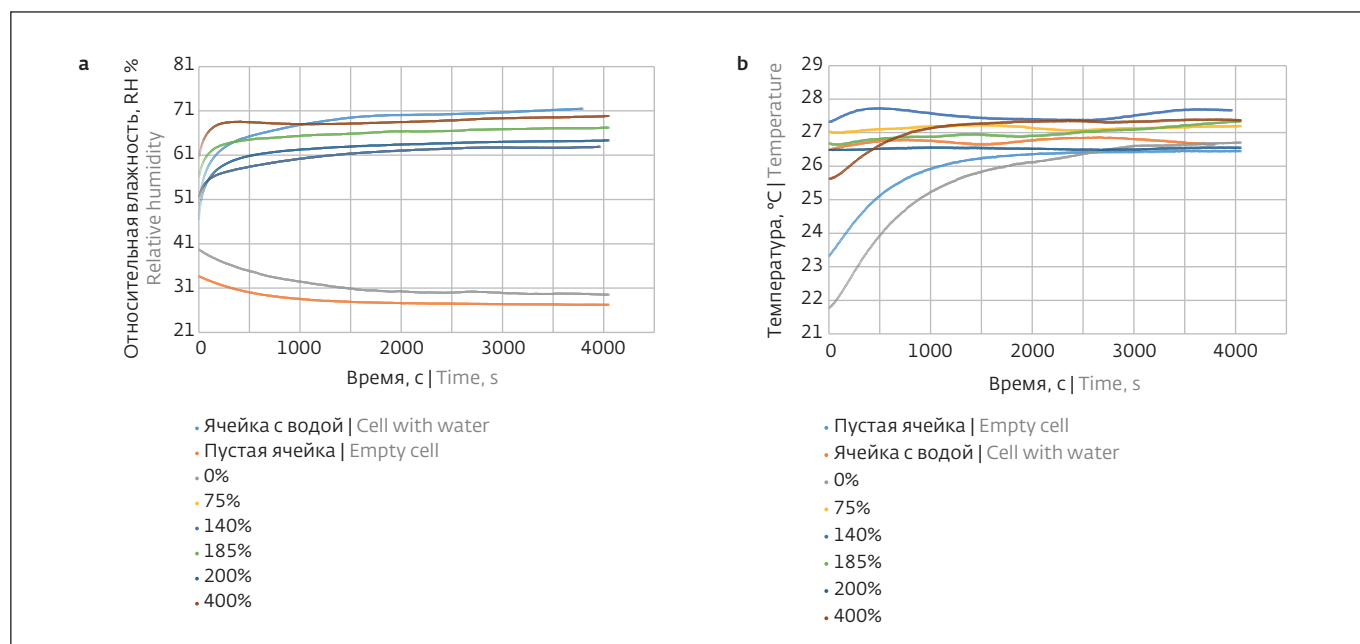


Рис.4. а – зависимость температуры от времени; б – зависимость относительной влажности RH% от времени для серии экспериментов: пустой ячейки; с водой; ячейки с водой и пленками различной степени деформации: от 0 до 400%. Тонкая линия – аппроксимирующая функция для соответствующих графиков RH% от времени

Fig.4. a – time dependence of temperature; b – time dependence of relative humidity RH % for a series of experiments: empty cell; with water; cell with water and films of different tensile strain: from 0 to 400%. The thin line is the approximating function for the corresponding RH % vs. time plots

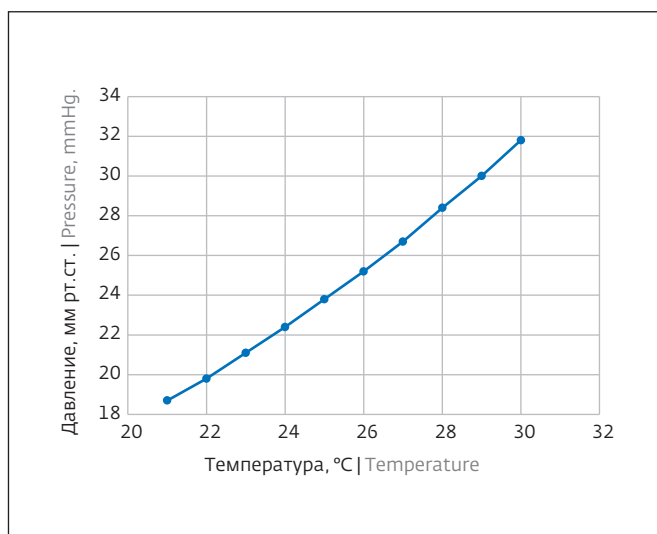


Рис.5. Зависимость давления насыщенных паров от температуры (точки – табличные значения, линия – нормировочная кривая)

Fig.5. Dependence of saturated vapour pressure on temperature (dots are tabulated values, line is the normalisation curve)

Для ячейки с водой не была достигнута ожидаемая 100% RH. Предположительно, это связано с ненасыщенными парами внутри ячейки. Поэтому на этом этапе оценка паропроницаемости может иметь исключительно качественный характер. Тем не менее, для лучшего понимания полученных данных %RH мы приводим способ пересчета единиц относительной влажности в абсолютную.

Для пересчета данных относительной влажности в абсолютную в единицы давления (мм рт.ст.) были использованы табличные значения давления насыщенных паров от температуры (в диапазоне от 21 до 30 °C) [9].

Табличные значения в диапазоне от 21 до 30 °C были аппроксимированы полиномом второй степени следующего вида:

$$p_0(T) = 11,51 - 0,44T + 0,04T^2, \quad (2)$$

где $p_0(T)$ – функция давления насыщенных паров над жидкостью от температуры; T – температура в градусах Цельсия.

Относительная влажность согласно определенной вычисляется по следующей формуле:

$$RH = \frac{p(T)}{p_0(T)} \times 100, \quad (3)$$

где RH – относительная влажность в %, $p(T)$ – абсолютная влажность (давление паров,

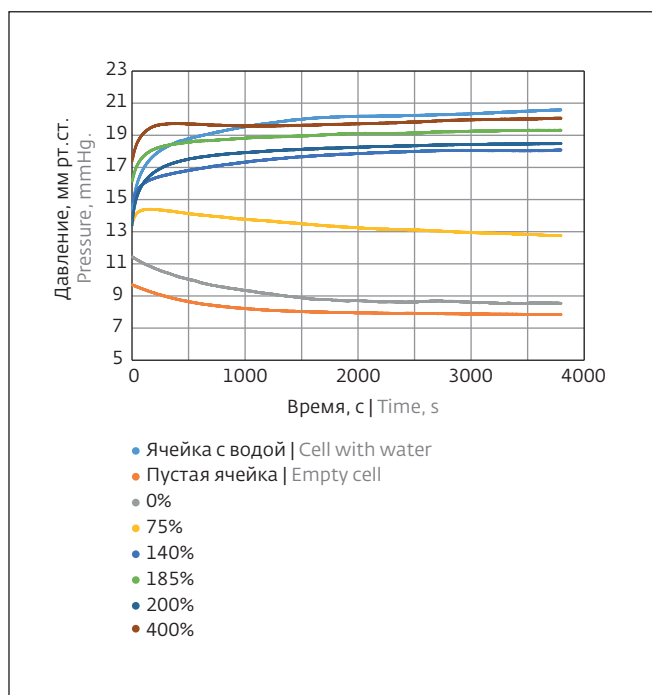


Рис.6. Графики зависимости абсолютной влажности $p(T)$ от времени. Тонкая линия – аппроксимирующая функция для соответствующих графиков $p(T)$ от времени

Fig.6. Plots of absolute humidity $p(T)$ versus time. The thin line is an approximation function for the corresponding graphs of $p(T)$ versus time

and films with 0%, 75%, 140%, 185%, 200% and 400% strain rate. All the films to be tested were fixed in a holder so that the water cell was placed on one side and the sensor on the other. Distilled water in a volume of 5 ml was chosen as the experimental liquid. The surface area read was 3.14 cm². This area value was chosen depending on the size of the limiter 4 placed around the perimeter of the sensor (Fig.1, b).

Figure 3 shows a graph of the relative humidity-temperature time dependence for an empty cell. In a closed cell in the absence of liquids and films, these values tend to be constant.

The temperature varied only slightly throughout all experiments. However, the data underwent a slight drift when the sample was replaced (Fig.4a), which caused scattering of the initial values. The final temperature reaches a plateau 2400–3000 seconds after the start of the experiment (40–50 minutes). The average temperature value is $\langle T \rangle = 27.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$, which is consistent with the average ambient temperature at which measurements were taken. The temperature error was calculated from the plateau section of the graph. This amounts to approximately 1,000 measurements. Similarly, the relative humidity value for the indicated systems (empty cell, cell with water, cell with



Таблица 2. Относительная и абсолютная влажность

Table 2. Relative and absolute humidity

Степень деформации, % Tensile strain	Относительная влажность, RH% Relative humidity	Абсолютная влажность, мм рт. ст. Absolute humidity, mmHg
Пустая ячейка Empty cell	27,3	7,9
0%	29,6	8,5
75%	42,2	12,1
140%	62,8	18,1
185%	66,7	19,2
200%	63,7	18,3
400%	68,8	19,8
Ячейка с водой, 5 мл Cell with water, ml	70,6	20,3

мм рт. ст.); $p_0(T)$ – давление насыщенных паров над жидкостью, мм рт. ст.

При подстановке (2) в (3) можно найти значение абсолютной влажности (давления пара над жидкостью):

$$p(T) = \frac{RH \times (11,51 - 0,44T + 0,04T^2)}{100\%}. \quad (4)$$

Аналогичным образом могут быть использованы табличные данные (плотность насыщенного пара) для пересчета абсолютной влажности в единицах плотности (г/м^3). Дальнейшие расчеты проведены для значения температуры $T = 27^\circ\text{C}$.

Кривые зависимости относительной влажности от времени (рис.4b) и абсолютной влажности от времени (рис.6) имеют схожий характер. Это связано с константой для пересчета относительной влажности в единицы абсолютной влажности, рассчитанной для температуры 27°C (табл.2).

Согласно полученным данным был построен график зависимости абсолютной влажности от степени деформации пленок ПЭВП (рис.7).

С увеличением деформации пропускная способность пленок нелинейно растет и выходит на плато в области значений для случая, когда отсутствует пленка, но ячейка заполнена водой. При этом до степени деформации 200% наблюдается симбатное увеличение паропроницаемости и объемной пористости полимерных пленок.

water and films with a tensile strain ranging from 0 to 400%) reached a plateau in 40–50 minutes (Fig.4, b).

For the cell with water, the expected 100% RH was not achieved. This is presumably due to unsaturated vapour inside the cell. Therefore, at this stage the vapour permeability estimation can be of a purely qualitative nature. Nevertheless, for a better understanding of the % RH data obtained, we provide an approach for converting relative humidity units to absolute humidity units.

To convert the relative humidity data to absolute humidity expressed in pressure units (mmHg), the tabulated values of saturated vapour pressure versus temperature (in the range 21 to 30 °C) were used [9].

The tabulated values between 21 and 30 °C were approximated by a second-degree polynomial of the following form:

$$p_0(T) = 11,51 - 0,44T + 0,04T^2, \quad (2)$$

where $p_0(T)$ is a function of the saturated vapour pressure over the liquid and T is the temperature in degrees Celsius.

According to the definition, the relative humidity is calculated using the following formula:

$$RH = \frac{p(T)}{p_0(T)} \times 100. \quad (3)$$

Where RH is relative humidity in %, $p(T)$ is absolute humidity (vapour pressure, mmHg), $p_0(T)$ is saturated vapour pressure over liquid, mmHg.

Однако на больших степенях деформации, когда начинают происходить перестройки структуры ПЭВП, сопровождающиеся некоторым уменьшением пористости (рис.7, кривая 2), сформированная взаимопроникающая открыто-пористая структура пленки и ее высокая паропроницаемость сохраняются. Подобные особенности пористой структуры, сформированные с использованием ориентационного растяжения в среде СК-СО₂, ранее были описаны в работе [6] для случая жидкостной проницаемости по этанолу. Полученные с помощью разработанной ячейки экспериментальные результаты указывают на хорошее соответствие с результатами, полученными с помощью традиционных методик определения величины WVTR и ранее использованными в том числе и для пленок с аналогичной пористой структурой [8].

ВЫВОДЫ

Разработано портативное устройство для проведения качественной оценки паропроницаемости пленочных материалов. Устройство было протестировано на примере пленок ПЭВП, одноосно деформированных в СК-СО₂. Показано, что отклик данной системы составляет меньше 10 с. Время выхода измеряемых величин на плато – 40–50 мин. Точность и надежность системы обеспечена конструктивными и программными особенностями ячейки (фиксация слоев, синхронизация данных и т.д.) и высокоточным датчиком, оснащенный металлическим водонепроницаемым корпусом, который защищает датчик от загрязнения и механических повреждений. Удалось установить зависимость равновесного значения относительной и абсолютной влажности водяного пара после прохождения пленки ПЭВП в зависимости от степени одноосной деформации пленки в среде СК-СО₂.

Данное устройство и разработанную методику можно рекомендовать как экспресс-метод для качественного изменения паропроницаемости пористых материалов. Модульность системы позволяет расширять горизонты измерений и использовать объекты разных размеров (от 20 до 55 мм в диаметре) с незначительной модификацией конструкции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 20-13-00178).

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте

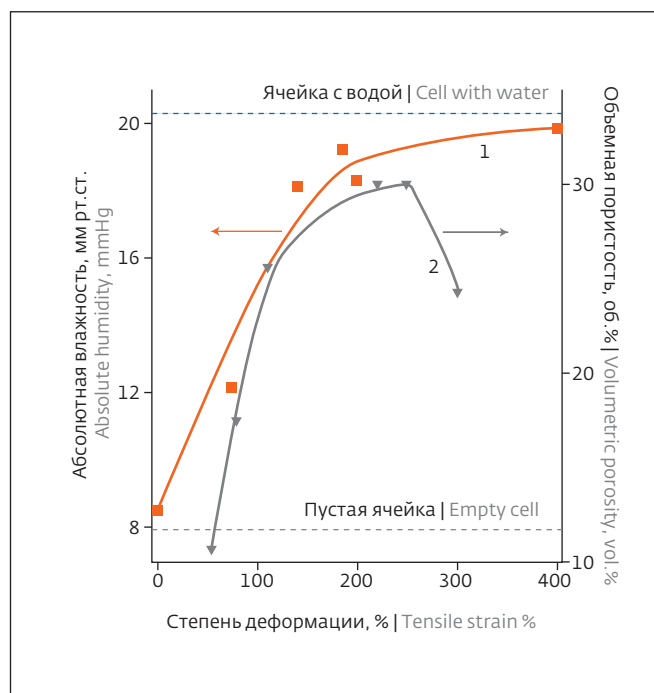


Рис.7. Зависимость (1) абсолютной влажности $p(T)$ (давления) – красная линия и (2) эффективной объемной пористости – серая линия от степени деформации пленок ПЭВП

Fig.7. Dependence of (1) absolute humidity $p(T)$ (pressure) – red line and (2) effective volumetric porosity – gray line on the tensile strain of HDPE films

By substituting (2) for (3), the value of absolute humidity (vapour pressure over liquid) can be found:

$$p(T) = \frac{RH \times (11,51 - 0,44T + 0,04T^2)}{100\%}. \quad (4)$$

Similarly, the tabulated data (saturated vapour density) can be used to convert absolute humidity into density units (g/m^3). Further calculations were carried out for the temperature value $T = 27^\circ C$.

Relative humidity vs. time (Fig.4, b) and absolute humidity vs. time (Fig.6) curves have similar character. This is due to the constant for conversion of relative humidity to units of absolute humidity calculated for a temperature of $27^\circ C$ (Table 2).

According to the obtained data, the absolute humidity content was plotted as a function of the tensile strain of the HDPE films (Fig.7).

With increasing strain, permeability of the films increases non-linearly and reaches a plateau in the region of values for the case where there is no film but the cell is filled with water. Up to a strain rate of 200%, there is a symbiotic increase in vapour permeability and volume porosity of the polymer films.

Testing&Control

25–27 октября 2022
Москва, Крокус Экспо

19-я Международная выставка
испытательного и контрольно-
измерительного оборудования



testing-control.ru



Измерительное
и метрологическое
оборудование



Оборудование
для лабораторного
контроля



Испытательное
оборудование



Оборудование
для неразрушающего
контроля и технической
диагностики



Производственный
контроль и машинное
зрение



Системы диагностики
и мониторинга

Забронируйте стенд
testing-control.ru



Организатор

MVK

Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru



журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Haghi A.K.** Mechanism of Heat and Mass Transfer in Moist Porous Materials. *Jurnal Teknologi*. 2012. 36, 1. <https://doi.org/10.11113/jt.v36.579>
2. **Ishizaki K., Komarneni S., Nanko M.** Porous Materials: Process technology and applications. Springer Science & Business Media. 2013. 240. ISBN 1461558115, 9781461558118.
3. **Lee J.** and others. Development of Multimodal Antibacterial Surfaces Using Porous Amine-Reactive Films Incorporating Lubricant and Silver Nanoparticles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. Vol. 11, no. 6. pp. 6550–6560. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b20092>
4. **Hu Y.** and others. Measurement of Water Vapor Transmission Rate in Highly Permeable Films. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001. Vol. 81. pp. 1624–1633. <https://doi.org/10.1002/app.1593>
5. **McCullough Elizabeth A.** and others. A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics. *Meas. Sci. Technol.* 2003. Vol. 14, pp. 1402–1408. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/8/328>
6. **Dudnik A.O., Trofimchuk E.S., Efimov A.V., Nikonorova N.I., Rukhlya E.G., Nikitin L.N., Yaminsky I.V., Volynskii A.L.** Evolution of the Nanoporous Structure of High-Density Polyethylene during Drawing in Supercritical Carbon Dioxide, *Macromolecules*. 2018. Vol. 51, no. 3, pp. 1129–1140. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.7b02177>
7. **Roenko A.O., Trofimchuk E.S., Efimov A.V., Armeev G.A., Nikonorova N.I., Nikolaev A.Yu., Volynskii A.L.** Memory effect in porous polyethylene films preliminarily deformed in the medium of supercritical CO₂. *Polymer Science, Series A*. 2021. Vol. 62, no. 5, pp. 471–484. <https://doi.org/10.1134/S0965545X21050126>
8. **Yarysheva A., Rukhlya E., Grokhovskaya T., Dolgova A., Arzhakova O.V.** Breathable polymeric materials based on high density polyethylene prepared by environmental crazing. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. P. 48567. <https://doi.org/10.1002/app.48567>
9. **Volkov A.I., Zharsky I.M.** Big chemical reference book – Mn.: Modern school. 2005. 608 p.

However, at higher tensile strain, when rearrangements of HDPE structure start occurring, accompanied by some reduction in porosity (Fig.7, curve 2), the formed interpenetrating open-porous structure of the film and its high vapor permeability are maintained. Similar features of the porous structure formed with the use of orientational stretching in SC-CO₂ medium have been previously described in [6] for the case of liquid ethanol permeability. The experimental results obtained with the developed cell indicate good agreement with the results obtained using traditional techniques for determining the value of WVTR, previously used also for the films with similar porous structure [8].

CONCLUSIONS

A portable apparatus for qualitative assessment of the vapour permeability of film materials has been developed. The device was tested with HDPE films uniaxially deformed in SC-CO₂. The response time of this system was shown to be less than 10 seconds. The time required for the measured values to reach the plateau is 40–50 minutes. The system accuracy and reliability are ensured by the design and software features of the cell (layer fixing, data synchronization, etc.) and high precision sensor equipped with a waterproof metal case that protects the sensor against contamination and mechanical damage. It was possible to establish the equilibrium value dependence of the relative and absolute humidity of water vapour after the HDPE film has passed through as a function of the degree of uniaxial deformation of the film in SC-SO₂ medium.

This device and the developed technique can be recommended as an express method for qualitative changes in the vapour permeability of porous materials. Modularity of the system makes it possible to extend the measurement horizon and to use objects of different sizes (from 20 to 55 mm in diameter) with little modification of the design.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was completed with the financial support of the RSF, project No. 20-13-00178.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Пятнадцатая международная специализированная выставка

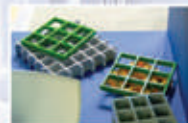
28 - 30 марта 2023

Москва, ЦВК «Экспоцентр»,
павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК), т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



ufi
Approved
Event

Expo Rating

выставка
участник
системы

независимый
выставочный
аудит

Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»

115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507

Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

YouTube youtube.com/user/compoexporusia

@compoexporus

@ocompo

Организатор:



ПОЛИУРЕТАНЭКС

Тринадцатая международная специализированная выставка

28 - 30 марта 2023

Москва, ЦВК «Экспоцентр»,
павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства полиуретанов (добавки, красители, катализаторы, наполнители, и т.д.)
- Оборудование и станки для производства и переработки полиуретанов (расходомерия, шестереночные, оседагональные (шнековые), шлепперные насосные установки, обрабатывающие станки, и т.д.)
- Конечная продукция (контактное уплотнение при литье, фильтры и т.д.)
- Услуги (лабораторные испытания, охрана здоровья и безопасность, переработка, защита окружающей среды, научные разработки)
- Техническое обслуживание оборудования
- Тестовое оборудование

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



ufi
Approved
Event

Expo Rating

выставка
участник
системы

независимый
выставочный
аудит

Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»

115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507

Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@polyurethanex.ru | Сайт: www.polyurethanex.ru

YouTube youtube.com/user/polyexporu

@polyexporus

@ocompo

Организатор:





ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

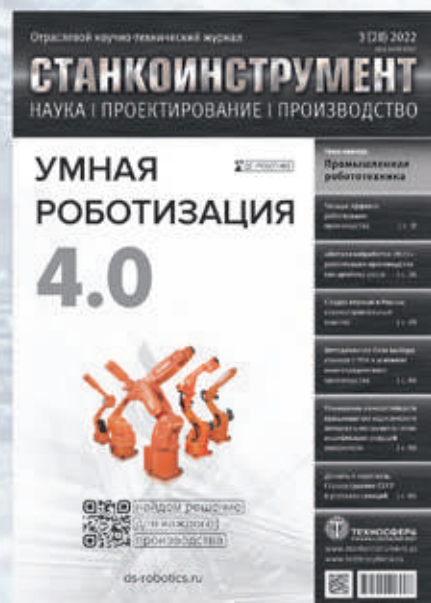
www.technosphere.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru