

Расход воздуха через материал и неплотности в упаковочных машинах

Д.В. Коврыженко, А.Г. Карлов, к.т.н., Севастопольский национальный технический университет

Анализ тенденций применения потребительской упаковки за рубежом и в Украине указывает на стабильное возращание объемов использования полимерных материалов для упаковывания пищевой продукции. К настоящему времени разработан определенный ассортимент упаковочных материалов и потребительской тары для пищевых продуктов, в том числе и для молока и молочной продукции.

Обеспечение безопасности пищевых продуктов в современных условиях является важнейшим приоритетом государственной политики в области здорового питания населения страны. Сегодня неотъемлемым моментом этой проблемы являются качество и безопасность упаковочных материалов, а также тары и вспомогательных упаковочных средств из них [1].

Одна из важных задач при создании новых упаковочных материалов — это обеспечение герметичности упаковки, вычисление и измерение газопрооницаемости многослойных пленочных материалов, например для упаковывания сухих пищевых и молочных продуктов [2, 3].

Рассматриваемый в данной работе подход к осуществлению контроля полости на герметичность является модификацией метода фиксирования массового расхода сжатого воздуха, установленного при утечке к моменту времени, либо фиксирования скорости падения давления в полости к моменту времени. Модификация заключается в проведении контроля полости подобно эксперименту на натурной модели, результатом которого является вычисление суммарной площади сечения отверстий, пор либо других дефектов, нарушающих герметичность [4].

При этом потребовалось применить такой метод проведения автоматизированного контроля полостей на гер-

метичность в серийном производстве, который дает возможность использовать данные полости в дальнейшем. Исходными данными при проведении контроля являются значение объема полости, климатические условия при проведении контроля, а также показания измерительной аппаратуры. Измерительная аппаратура для таких комплексов относительно сложна и имеет высокую стоимость. Поэтому желательным является использование минимума измерительной техники.

Разрабатываемая автоматизированная система контроля полости на герметичность основана на следующих основных принципах: наполнение полости сжатым воздухом, выдержка времени для установления давления заданного уровня, отсечение полости от потребления воздуха из магистрали, а также технологическая выдержка времени для наблюдения за его состоянием.

Процессы, связанные с изменением состояния сжатого воздуха, являются термодинамической системой, для которой механическая энергия не увеличивается, а изменяется лишь ее внутренняя энергия [4]. К примеру, при нагнетании давления воздуха в компрессоре [5].

С учетом ряда допущений о том, что не происходит изменения температуры при выхлопе сжатого воздуха из полости, и на основании описания термодинамики процессов течения газов, а также выражений Сен-Венана Ванцеля были получены зависимости параметров избыточного давления и массового расхода в полости при утечке сжатого воздуха от времени [4, 6]:

$$P_{ИЗБ}(t) = \begin{cases} P_A \left(\sqrt{\frac{P_{УС.ИЗБ}}{P_A}} - Z \cdot t \right)^2, & t \in [0; t_1]; \\ 2P_A \cdot e^{-Z(t-t_1)} - P_A, & t \in [t_1; t_1 + t_{II}]; \\ 0, & t \in [t_1 + t_{II}; +\infty]; \end{cases} \quad (1)$$

$$t_1 = \frac{1}{Z} \left(\sqrt{\frac{P_{УС.ИЗБ}}{P_A}} - 1 \right); \quad (2)$$

$$t_{II} = \frac{\ln 2}{Z}; \quad (3)$$

$$Z = \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot S_{ЭФ}}{V \cdot a}; \quad (4)$$

$$a = \sqrt{\frac{M}{R \cdot T}}; \quad (5)$$

$$Z_{MAX} = \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot S_{MAX}}{V \cdot a}, \quad (6)$$

где $P_{ИЗБ}$ — текущее значение избыточного уровня давления в полости от времени;

P_A — атмосферное давление воздуха, для условий эксперимента $P_A \approx 99424$ Па;

$P_{УС.ИЗБ}$ — избыточное значение давления сжатого воздуха в установившемся режиме после отсечки, Па;

Z — частота истечения сжатого воздуха из полости, 1/с;

Z_{MAX} — максимальная частота истечения сжатого воздуха из полости (1/с) при обнаружении максимальной площади сечения пор, м²;

a — обратная величина скорости звука в окружающей среде, с/м;

k — показатель адиабаты, для воздуха имеет значение $k = 1,4$;

$S_{ЭФ}$ — эффективная площадь сечения отверстия, м²;

V — объем полости, м³;

M — молярная масса газа, для воздуха $M = 0,029$ кг/моль;

R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К);

T — абсолютная температура воздуха, для условий эксперимента $T = 301$ К;

t_1 — длительность нахождения рабочего тела в надкритическом режиме, с;

t_{II} — длительность нахождения рабочего тела в подкритическом режиме, с.

Определить значение эффективной площади сечения отверстия пор возможно лишь при опросе измерительной

аппаратуры в кратчайшее время $t_{ПР}$ (7), наличие которого объясняется проведением контроля по выявлению максимума расхода сжатого воздуха:

$$0 < t_{ПР} \leq \frac{1-L}{Z_{MAX}} \left(2 \sqrt{\frac{P_{УС.ИЗБ}}{P_A}} - 1 \right); \quad (7)$$

Функциональная зависимость эффективной площади пор по показаниям аналогового датчика давления к моменту времени $t_{ПР}$ (где L — отношение измеренного значения площади сечения к фактическому) определяется следующим образом:

$$S_{ЭФ} = \frac{a \cdot V(P_{УС.ИЗБ} - P_{ИЗБ}(t_{ПР}))}{k(2\sqrt{P_{УС.ИЗБ} \cdot P_A} - P_A)t_{ПР}}. \quad (8)$$

На рис. 1 показана структурная схема проведения эксперимента на выявление количественных параметров воздуха при утечке из полости ограниченного объема. В ходе эксперимента для различных положений винта дросселя n замеряются длительности t_I и t_{II} . Нажатием на кнопку $SB1$ (рис. 2) происходит наполнение полости ресивера $R1$ (рис. 3) сжатым воздухом. После установки в полости давления необходимого уровня нажатием кнопки $SB2$ осуществляется перевод распределителя $V2$ и отсечка сжатого воздуха в полости. Построение зависимости избыточного уровня давления в полости P от времени предлагается осуществить подключением реле давления $RP1$ к ресиверу $R1$. Аналоговые выходы $RP1$ аналогово-цифрового преобразователя необходимо подключить к EasyPort с помощью интерфейса COM ПЭВМ. Программный пакет для ПЭВМ от FESTO DIDACTIC — FluidLab-Pv1.0 — обеспечивает запись показаний измерительной аппаратуры. Нагнетание сжатого воздуха в пневматической магистрали обеспечивается компрессором CR модели JUN-AIR ZUA408 [5].

Мощность электродвигателя компрессора $P_{ДВ} = 0,34$ кВт, обеспечиваемый объемный расход составляет 50 л/мин. При использовании компрессора с рабочим давлением $P_{ИЗБ} = 600$ кПа обеспечиваемая длительность непрерывной работы не более 33 мин, после происходит простой длительностью 27 мин. При использовании

компрессора с рабочим давлением $P_{ИЗБ} = 500$ кПа обеспечиваемая длительность непрерывной работы не более 39 мин, после происходит простой длительностью 21 мин. При использовании компрессора с рабочим давлением $P_{ИЗБ} = 400$ кПа обеспечиваемая длительность непрерывной работы не более 45 мин, после происходит простой длительностью 15 мин. В данной работе рассматриваются результаты экспериментов для рабочего давления $P_M = 600$ кПа. Компрессор оснащен воздухохранилищем $A1$, использование которого обеспечивает снижение пульсаций давления сжатого воздуха. Блоком подготовки сжатого воздуха PUCA модели LFR-M5-D-7-5M-MICRO обеспечивается регулирование давления в полости. Пневматическим 3/2 распределителем с ручным управлением $V1$ осуществляется выхлоп сжатого воздуха из ресивера $R1$, который проходит через дроссель $D1$. Наполнение и отсечка ресивера $R1$ осуществляется 5/2 распределителем $V2$ модели VSVA-B-B52-ZD-A2-1T1L (бистабильное электропневматическое управление). Полость ресивера $R1$ модели CRVZS-0,4 (объем полости 0,4 м³) с обеих сторон закрыта пневматическими дросселями $D1$ и $D2$ модели GRLA-M5-QS-4-D (диаметр условного выходного отверстия 4 мм, присоединительная резьба $M5$). Используемое реле давления $RP1$ модели SDE1-D10-G2-H18-C-PU-M8 имеет погрешность измерений порядка 2 %. На рис. 4 показан общий вид лабораторной установки. Пневматические элементы соединены шлангами PUN-4x0,75-S1, внешний диаметр трубки 4 мм, толщина стенок 0,75 мм. Электрические элементы являются дидактическими и подключены электрическими проводами к источнику питания постоянного тока напряжением 24 В.

Предварительное сопоставление экспериментальной и моделируемой зависимости уменьшения избыточных уровней давлений в полости со сжатым воздухом выявило расхождение относительно длительностей процесса утечки, выполнив предположение о том, что построенная математиче-

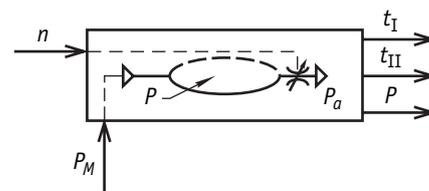


Рис. 1. Структурная схема проведения эксперимента на натурной модели

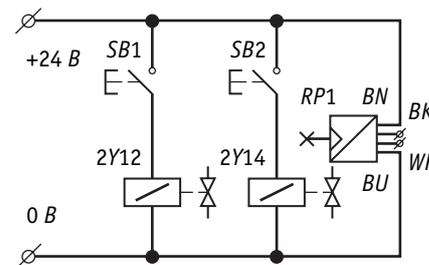


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема лабораторной установки

ская модель по системе управления (1) на основании фактической настроечной характеристики дросселя GRLA-M5-QS-4-D не учитывает расхождения экспериментальных данных, полученных в ходе различных экспериментов (фактическая настроечная характеристика получена при анализе выдвижения штока пневмоцилиндра с дросселем на выходе). Если такое расхождение является постоянным на протяжении различных режимов утечки сжатого воздуха, то поправочные коэффициенты определяются следующим образом:

$$S_I = \mu_I \cdot S_\Phi; \quad (9)$$

$$S_{II} = \mu_{II} \cdot S_\Phi; \quad (10)$$

$$\mu_I = \frac{t_{IM}}{t_{IЭ}}; \quad (11)$$

$$\mu_{II} = \frac{t_{IIM}}{t_{IIЭ}}, \quad (12)$$

где S_I и S_{II} — приведенные значения эффективных площадей сечения условного прохода, м²;

μ_I и μ_{II} — поправочные коэффициенты расхода сжатого воздуха в полости; S_Φ — фактическое значение площади сечения условного прохода, м²;

t_{IM} и t_{IIM} — моделируемые длительности соответственно надкритического и подкритического режимов воздуха в полости, с;

$t_{IЭ}$ и $t_{IIЭ}$ — экспериментальные длительности соответственно надкритического

и подкритического режимов воздуха в полости, с.

На рис. 5 показан пример сопоставления экспериментальной и приведенной моделируемой зависимости. При сопоставлении экспериментальных и приведенных моделируемых зависимостей избыточных уровней давления сжатого воздуха в полости для различных положений винта дросселя обнаружено изменение поправочных коэффициентов расхода сжатого воздуха в полости.

Также при расчете по выражениям (2–5, 11, 12) можно показать, что для надкритического режима поправоч-

ные коэффициенты расхода выше, чем для подкритического.

На рис. 6 показаны зависимости поправочных коэффициентов расхода сжатого воздуха в полости от увеличения площади сечения условного прохода дросселя при надкритическом и подкритическом режимах.

На рис. 7 показано сопоставление фактической и измеренной настроечных характеристик дросселя. Настроечная характеристика дросселя определяет количество полных поворотов, приводящих площадь сечения условного прохода к определенному значению. При регулировании дросселя в ходе

эксперимента на натурной модели наблюдается расхождение настроечных характеристик. Такое расхождение объясняется принципиальным различием экспериментов, в ходе которых данные зависимости получены.

Анализ метода контроля герметичности вычислением площади отверстия показал, что необходимы дополнительные исследования характера снижения избыточного уровня давления в полости. На результаты вычислений также влияют конструктивные особенности полостей: наличие паразитных полостей, резких сужений или расширений, которые

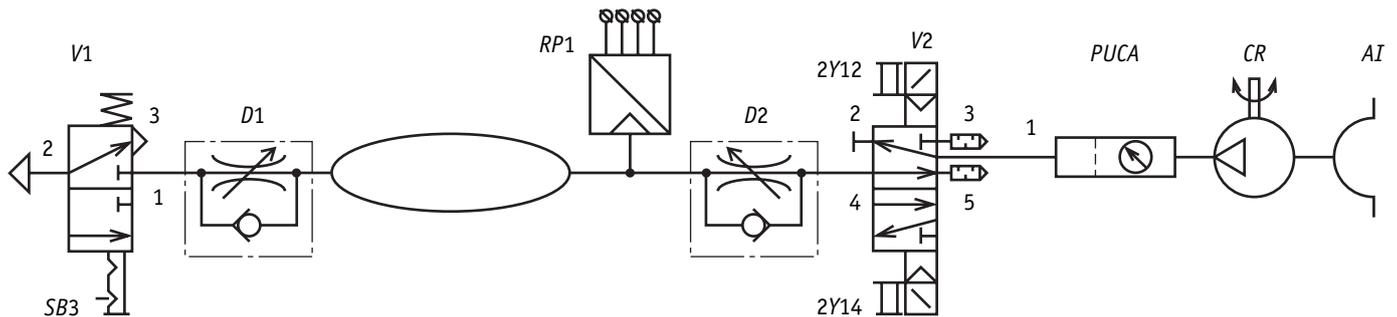


Рис. 3. Пневматическая принципиальная схема лабораторной установки

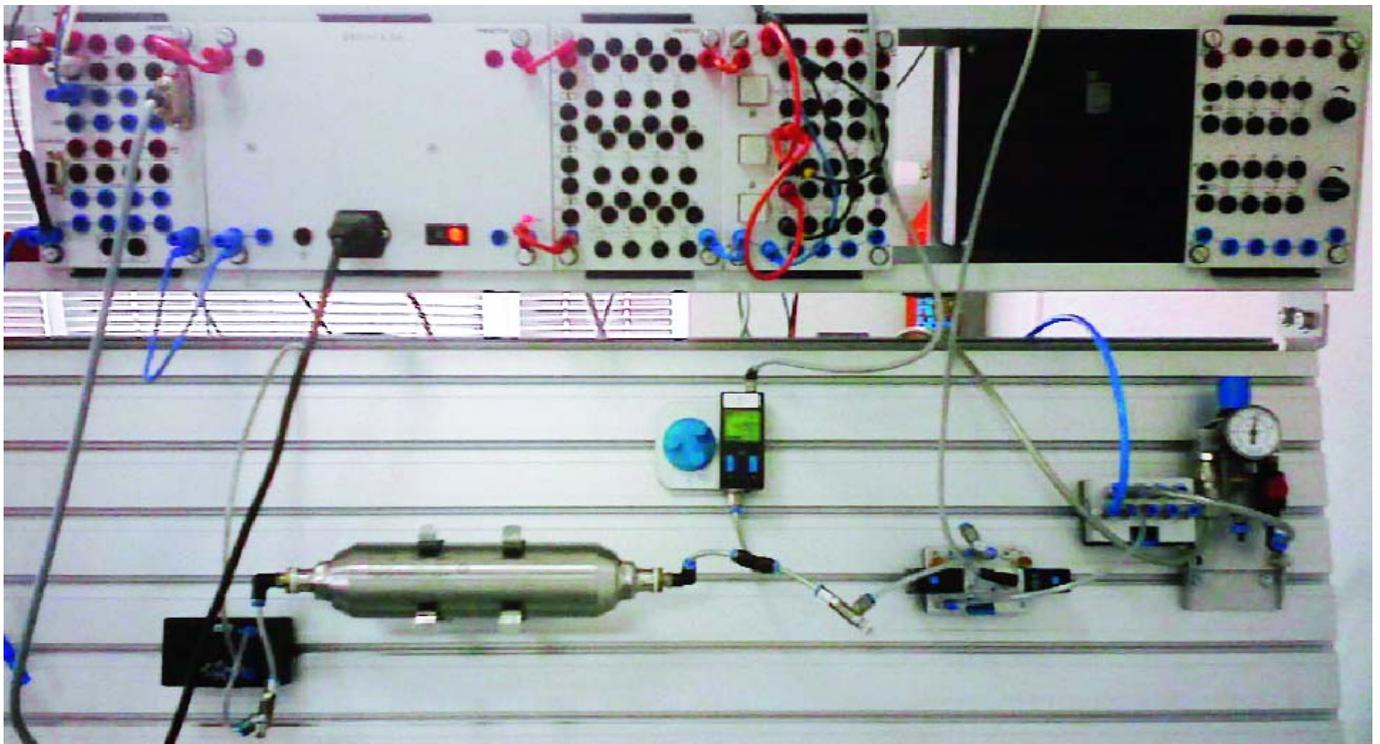


Рис. 4. Общий вид лабораторной установки. Элементная база FESTO-DIDACTIC

приводят к увеличению местных потерь давления, степени пористости материалов, например многослойных пленочных, используемых для упаковывания. Заданный алгоритм проведения контроля можно использовать для объектов производства, требующих как избыточного уровня давления, так и разрежения воздуха с целью создания вакуума. Результаты и методика проведенных исследований могут быть полезны при анализе газопроницаемости многослойных пленочных материалов для упаковывания сухих пищевых и молочных продуктов при их создании

и внедрении [2]. Их можно использовать и при синтезе новых упаковочных материалов с заданными барьерными свойствами [3].

Литература

1. Федотова О.Б. Проблемы герметичности упаковки для цельномолочных продуктов // Упаковка и упаковочное оборудование: Материалы Международной научно-практической конференции. — М., 2007. — С. 110–112.
 2. Федотова О.Б. Исследование газопроницаемости многослойных пле-

ночных материалов для упаковки сухих пищевых и молочных продуктов / О.Б. Федотова, М.Ю. Нагорный // Научное обеспечение молочной промышленности (ВНИМИ — 80 лет): Сборник научных трудов. — М.: ГНУ ВНИМИ, 2009. — С. 378–380.
 3. Федотова О.Б. Упаковочные материалы с барьерными свойствами // Переработка молока. — 2009. — № 6. — С. 14–15.
 4. Герц Е.В. Расчет пневмоприводов: Справочное пособие / Е.В. Герц, Г.В. Крейнин. — М.: Машиностроение, 1975. — 272 с., ил.
 5. Пашков Е.В. Электropневмоавтоматика в производственных процессах: Учеб. пособие/ Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский, А.А. Четверкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. — 496 с.
 6. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. — 8-е изд., стер. — М: Высш. шк., 2004. — 544 с., ил.

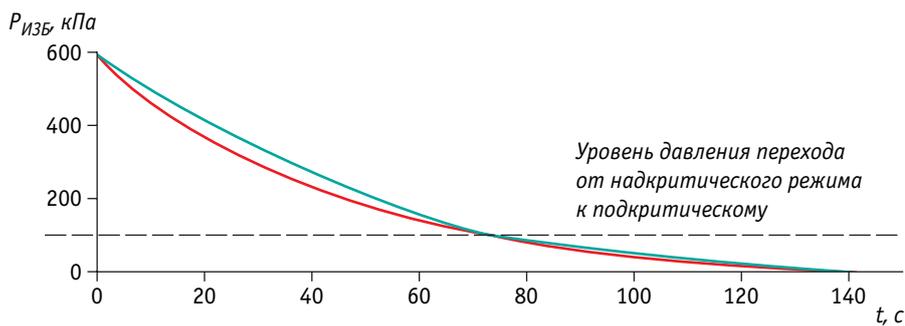


Рис. 5. Сопоставление зависимостей избыточных уровней давления P от времени t для положения винта дросселя n = 1/8 полного поворота: экспериментальная (—), приведенная моделируемая (—)

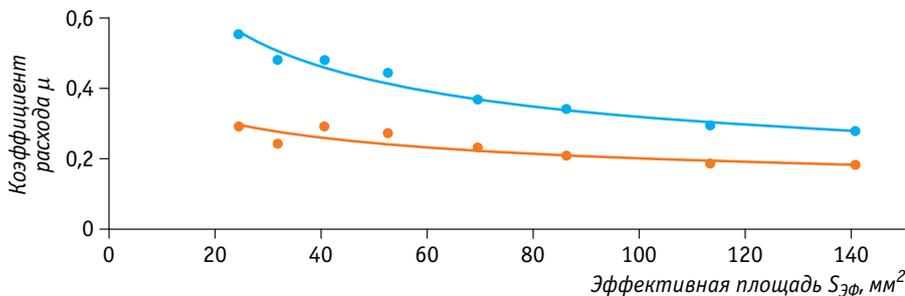


Рис. 6. Зависимости поправочных коэффициентов расхода от значения эффективной площади условного прохода: надкритический (—●—), подкритический (—●—) режимы

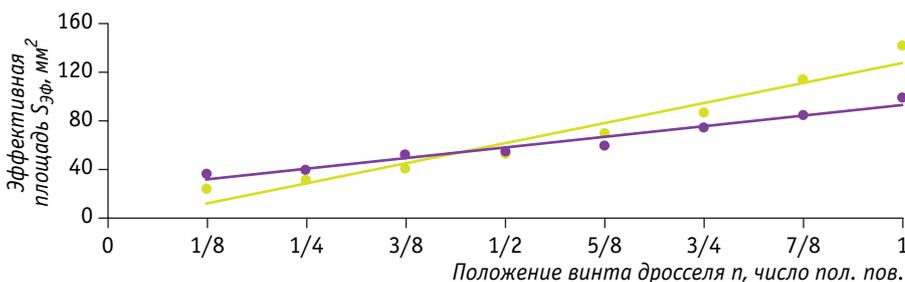
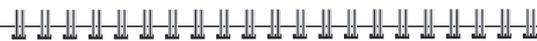


Рис. 7. Сопоставление настроечных характеристик дросселя модели GRLA-M5-QS-4-D: фактическая (—●—), полученная в ходе эксперимента с полостью ограниченного объема (—●—)



Витрата повітря крізь матеріал і нещільності у пакувальних машинах
 Д.В. Ковриженко, А.Г. Карлов, к.т.н.

Авторами розроблено алгоритм проведення контролю герметичності порожнин різних виробів і матеріалів. Виконано аналіз значень розміру дефектів і тривалості виткання повітря з порожнини, отриманих моделюванням та експериментально. Авторами також проведені експерименти для пневматичних порожнин, що використовуються за робочого тиску близько 400–600 кПа. Методика розрахунку витоків може бути застосована під час проектування нових пакувальних матеріалів і форм упаковки продуктів, що вимагають забезпечення герметичності із заданими властивостями.

Ключові слова: пакувальний матеріал; газопроникність; герметичність; експериментальна установка; стиснене повітря; дросель; коефіцієнт витрати.

Air flow through the material and leaks in packaging machines

D.V. Kovryzhenko, A.G. Karlov, Ph.D.

The authors have developed an algorithm for controlling impermeability cavities of various products and materials. The analysis of the values of the size of the defects and the duration of the expiration of air from the cavity of the simulation and experiment. The authors also conducted experiments for pneumatic vacuum that are used at an operating pressure of the order of 400–600 kPa. Method of calculating the leakage can be applied in the design of new packaging materials and forms of packaging products that require security seal with predetermined properties.

Key words: packaging material; permeability; impermeability; pilot plant; compressed air; throttle; discharge coefficient.

