



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ВАКУУМНОГО ЗАХВАТА ДЛЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.В. Якимчук, А.Н. Гавва

*В статье разработана математическая модель воздухопроницаемости пористых упаковочных материалов. Адекватность математической модели реальным процессам проверена авторами путем экспериментальных исследований. Полученные результаты исследований рекомендованы для применения при выполнении расчетов и выбора элементов вакуумных захватывающих устройств упаковочного оборудования.*

## EFFECT OF POROSITY OF PACKAGING MATERIALS ON HOLDING FORCE PACKAGES WITH VACUUM CLAMPING DEVICE

N.V. Yakimchuk, D., A.N. Gavva

*The authors developed a mathematical model of air permeability of porous packaging materials. The adequacy of mathematical models to real processes is tested by the authors of experimental studies. The results obtained are recommended for use in performing the calculations and the choice of the elements of vacuum gripping device packaging equipment.*

Упаковочная индустрия сегодня это большая номенклатура упаковочных материалов, которые отличаются между собой по физико-химическим и механическим свойствам имеют разную массу и могут обеспечить изготовление оригинальной и функциональной потребительской упаковки для любого пищевого продукта.

Для обеспечения непрерывного производственного процесса с возможностью использования различной потребительской упаковки необходимо предусмотреть быструю переналадку технических систем в случае изменения форм, размеров упаковки, или технологического цикла. Для таких целей сегодня все больше используются роботизированные комплексы.

Одним из основных функциональных модулей промышленных роботов, применяемых в упаковочной индустрии, являются захватные устройства. Они используются для захвата, удержания упаковки и перемещение грузов по заданной траектории.

Требования, предъявляемые к захватным устройствам, условно можно разделить на две группы: общие и специальные. К общим требованиям относятся сохранение товарного вида упаковочных единиц, надежность ее захвата и удержания. Специальные требования, как правило, связанные с особенностью выполнения производственных условий в процессе формирования групповой упаковки.

Проведенный анализ захватывающих устройств показал, что наиболее широко применяются пневматические захватные устройства, среди которых популярными явлениями конструкции, в которых для удержания упаковок используют вакуум[1].



Такие устройства являются наиболее универсальными для упаковок разной геометрической формы и менее требовательны к материалам, отличаются простой конструкцией и быстрым обслуживанием. Система получения вакуума и схема управления состоит только из двух основных элементов: присосок и вакуумного устройства.

Материал присоски выбирают в зависимости от вида материала упаковки, формы ее поверхности и режима работы устройства. Для получения вакуума используют компрессор или вакуумный генератор. Выбор устройства образования вакуума зависит от глубины вакуума и расхода воздуха. Большие расходы обеспечивает компрессор, а небольшие — вакуумный генератор.

Как и в большинстве других конструкций захватывающих устройств, в вакуумных захватывающих устройствах иногда появляется вероятность отрыва упаковки от присоски в процессе ее перемещения. В основном отрывы происходят при влиянии на упаковку больших динамических нагрузок, величины которых превышают допустимые, а также в случае изменения силы удержания. Для того чтобы предотвратить отрыв, ограничивают значение кинематических и динамических параметров перемещения упаковки, что, соответственно, уменьшает производительность оборудования, или увеличивают значения расхода воздуха, обеспечивая тем самым, увеличение усилия удержания. Значения силы удержания существенно зависят от вида материала упаковки.

Упаковку, в зависимости от способности сохранять начальную форму, условно можно разделить на две группы: жесткую и мягкую.

Жесткой называют такую упаковку, которая под действием внешней нагрузки сохраняет начальную форму и размеры. К наиболее распространенным материалам, из которых изготавливают жесткую упаковку, можно отнести и картон. Одной из важных характеристик картона как объекта перемещения вакуумными захватывающими устройствами является его пористость, которую можно оценить через коэффициент воздухопроницаемости. Величина воздухопроницаемости картона существенно влияет на конструктивное выполнение рабочих органов упаковочных машин, особенно при применении вакуумных захватывающих устройств. А поэтому целью данной работы является исследование величины усилия удержания вакуумного захвата при перемещении упаковок, изготовленных с пористого материала.

Для расчета параметров газового потока, который проходит сквозь пористый объект, были приняты такие предположения: реальный объект (упаковка) был заменен пластиной постоянной толщины  $b$ , которая равномерно пронизана системой капилляров (рис. 1); пластина является достаточно жесткой; перемещение воздуха в порах объекта является ламинарным; термодинамический процесс изменения состояния воздуха в порах объекта является изотермическим.

Так объемные затраты  $Q_x$  воздуха сквозь капилляр в любой точке капилляра на расстоянии  $x$  от поверхности объекта можно определить за формулой, что используется для перемещения жидкости [2]:

$$Q_x = -\frac{\pi \cdot r_k^4}{8 \cdot \mu} \frac{dP_x}{dx}, \quad (1)$$

где  $r_k$  — радиус капилляра, м;

$\mu_0 = 1,71 \cdot 10^{-5} + 4,94 \cdot 10^{-8} t$  - коэффициент динамической вязкости воздуха, кг/(с·м);

$t$  - температура воздуха, °C;  $\frac{dP_x}{dx}$  - градиент давления воздуха в точке  $x$  капилляра.

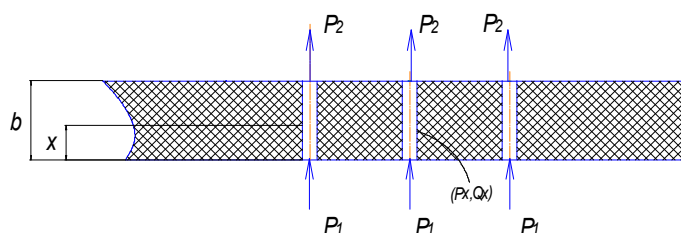


Рис.1 Модель пористого материала

В результате упругости воздуха объемные затраты по длине капилляра являются величинами переменными. Для определения этой производной используем условие постоянства массовых затрат:

$$Q_x \cdot \rho_x = const, \quad (2)$$

где  $\rho_x$  — удельная масса воздуха в точке капилляра на расстоянии  $x$  от поверхности объекта,  $\text{кг/м}^3$ .

Колебание температуры воздуха во время его прохождения сквозь пористую заготовку незначительные, поэтому справедливое изотермическое соотношение [3]:

$$\frac{\rho_x}{P_x} = \frac{1}{R \cdot T_a} = const, \quad (3)$$

где  $P_x$  — абсолютное давление воздуха в сечении капилляра на расстоянии  $x$  от поверхности объекта, Па;

$R = 287,14 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  — газовая постоянная для воздуха;

$T$  — абсолютная температура воздуха в сечении капилляра, К.

Следовательно, уравнение неразрывности изотермического газового потока в капилляре имеет вид:

$$Q_x \cdot P_x = -\frac{\pi \cdot r_k^4}{8\mu_0} \cdot \frac{dP_x}{dx} \cdot P_x = const, \quad (4)$$

то есть дифференциальную часть уравнения (4) можно записать в виде:

$$\frac{dP_x}{dx} \cdot P_x = const. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) с учетом начальных условий  $x = 0, P_x = P_1$  и предельных условий  $x = b, P_x = P_2$  дает возможность найти распределение давления по длине капилляра:

$$P_x^2 = \frac{P_2^2 - P_1^2}{b} \cdot x + P_1^2 \quad (6)$$

где  $P_1$  — абсолютное давление на входе капилляра, Па;

$P_2$  — абсолютное давление на выходе капилляра, Па, то есть это давление, которое создается вакуумным генератором в захватывающем элементе.

Тогда производная равняется:

$$\frac{dP_x}{dx} = \frac{P_2^2 - P_1^2}{2 \cdot P_x \cdot b}. \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в формулу (1), найдем объемный расход воздуха сквозь сечения капилляра на расстоянии  $x$  от поверхности объекта:

$$Q_x = \frac{\pi \cdot r_k^4}{16\mu_o \cdot b} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{P_x}. \quad (8)$$

Из последней формулы можно сделать вывод, что объемный расход воздуха на выходе из элементарной площади  $dS$  пористого объекта пропорциональный разнице квадратов давления на входе и на выходе и определяется с уравнения:

$$dQ_j = \frac{\xi}{\mu \cdot b} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{P_2} dS, \quad (9)$$

где  $\xi$  — коэффициент, которым можно характеризовать воздухопроницаемость упаковочного материала,  $\text{м}^2$ .

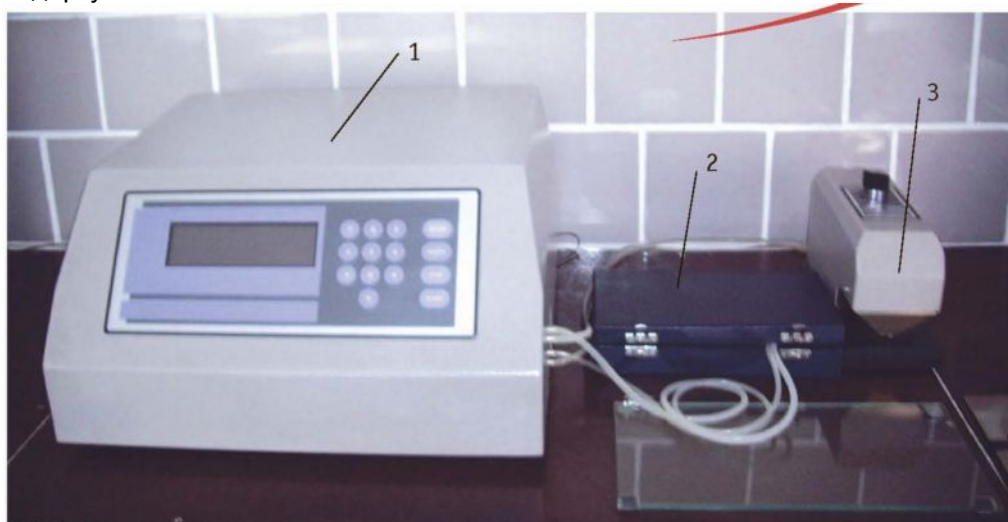
Если задаться площадью  $S$  заготовки, то объемный расход воздуха  $Q_s$  можно определить из уравнения:

$$Q_s = \frac{\xi}{\mu \cdot b} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{P_1} \cdot S. \quad (10)$$

Коэффициент  $\xi$  можно определить, если экспериментально определить объемный расход воздуха  $Q_s$ , что проходит сквозь пористую заготовку в атмосферу при создании на ее поверхности площадью  $S$  абсолютного давления  $P_1$ . При таких условиях из уравнения (10) можно определить коэффициент  $\xi$ , что характеризует воздухопроницаемость материала:

$$\xi = \frac{Q_s \cdot b \cdot \mu}{S} \cdot \frac{P_2}{P_1^2 - P_2^2}. \quad (11)$$

Объемный расход воздуха  $Q$  для некоторых марок картона был определен экспериментально с помощью лабораторной установки Messmer Buchel K513 (рис.2). В основу методики исследования воздухопроницаемости положен метод Бендтсена, который отвечает общепринятым требованиям для таких устройств, согласно стандарту ISO 5636-3.



**Рис. 2.** Лабораторная установка Messmer Buchel K513 для определения воздухопроницаемости пористых материалов: 1 — измерительный прибор; 2 — устройство подачи воздуха; 3 — измерительная головка.



Воздухопроницаемость картона по методу Бендтсена определялась как средняя величина воздушного потока, который проходит сквозь картонный образец, который зажат между металлическим кольцом и резиновой прокладкой. Площадь поверхности картона, который исследовался, составляла  $10 \text{ см}^2$ . Металлическое кольцо было прижато к поверхности картона специальным устройством, обеспечивая давление  $100 \text{ кПа}$ . Затем сквозь кольцо подавали сжатый воздух с давлением  $P$  в пределах  $140\text{—}150 \text{ кПа}$ .

В табл.1 приведены результаты экспериментальных исследований расходов воздуха сквозь образец разных марок картона и рассчитанные значения коэффициента  $\xi$  воздухопроницаемости. Во время выполнения проектных расчетов вакуумных захватывающих устройств нужно учитывать все факторы, которые влияют на усилие удерживания паковочных единиц. Во время перемещения упаковки вертикально вверх при ее удержании за плоскую недеформированную поверхность, сила удержания  $F$  может быть определена по формуле:

$$F = k_2 \cdot (mg + m\ddot{y}) \quad (12)$$

где  $k_2$  — коэффициент, который учитывает динамику работы устройства;

$m$  — масса паковочной единицы;

$y$  — ускорение движения паковочной единицы с захватывающим устройством;

$g$  — гравитационное ускорение.

В свою очередь сила удержания формируется силой притягивания упаковки захватывающим элементом, которая определяется по формуле:

$$F = k_1 \cdot f_{\text{эф}} (P_a - P_2), \quad (13)$$

где  $k_1$  — коэффициент, который учитывает шероховатость поверхности упаковки;

$f_{\text{эф}}$  — эффективная площадь контакта захватывающего элемента с упаковкой;

$P_a$  — атмосферное давление воздуха (давление воздуха окружающей среды, в котором работает захватывающее устройство);

$P_2$  — абсолютное давление воздуха в полости между захватывающим элементом и поверхностью упаковки.

То есть для удерживания и перемещения упаковки при известных или постоянных значениях  $f_{\text{эф}}$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  и  $\xi$  важно знать разницу давлений:

$$P_a - P_2 = \frac{k_2 (mg + m\ddot{y})}{k_1 \cdot f_{\text{эф}}}. \quad (14)$$

Таким образом, при известных значениях  $P_2$ ,  $m$ ,  $\xi$ ,  $f_{\text{эф}}$  и  $\xi$ , по формуле (10) можно определить дополнительный расход воздуха в вакуумном генераторе для удерживания упаковок, изготовленных из пористых материалов, а по уравнению (13) усилие удерживания.



Таблица 1. Значения коэффициента воздухопроницаемости

| Марка картона                                                              | Расходы воздуха<br>$Q_s$ , мл/мин | Коэффициент $\xi$<br>воздухопроницаемости, $\text{м}^2 \cdot 10^{-4}$ |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Хром - эрзац макулатурный марки Н первого сорта,<br>ТУ У 05509659-008-2000 | 62                                | 0,678                                                                 |
| Макулатурный картон марки НМ,<br>ТУ У 21.1-05509659-008-2001               | 77                                | 0,842                                                                 |
| Тарный макулатурный картон КТ – 25, ТУ У 21.1-5509659-026:2005             | 139                               | 1,330                                                                 |
| Для плоских слоев гофрированного картона К-2, ГОСТ 7420-89                 | 122                               | 1,170                                                                 |
| Макулатурный картон марки ММ, ТУ У 21.1-05509659-020-2001                  | 78                                | 0,854                                                                 |

Для проверки адекватности теоретических исследований усилия удерживания реальным условиям, была разработана, изготовлена и смонтирована экспериментальная установка, представленная на рис 3.

Таблица 2. Значения усилия удерживания

| Марка картона                                                               | Усилие удерживания $F$ , Н  |                          |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|                                                                             | экспериментально полученное | аналитическое полученное |
| Хром - эрзац макулатурный марки Н первого сорта ,<br>ТУ У 05509659-008-2000 | 56,84                       | 60                       |
| Макулатурный картон марки НМ,<br>ТУ У 21.1-05509659-008-2001                | 54,88                       | 51                       |
| Тарный макулатурный картон КТ – 25, ТУ У 21.1-5509659-026:2005              | 44,1                        | 47                       |
| Для плоских слоев гофрированного картона К-2, ГОСТ 7420-89                  | 49                          | 52                       |
| Макулатурный картон марки ММ, ТУ У 21.1-05509659-020-2001                   | 59,78                       | 64                       |

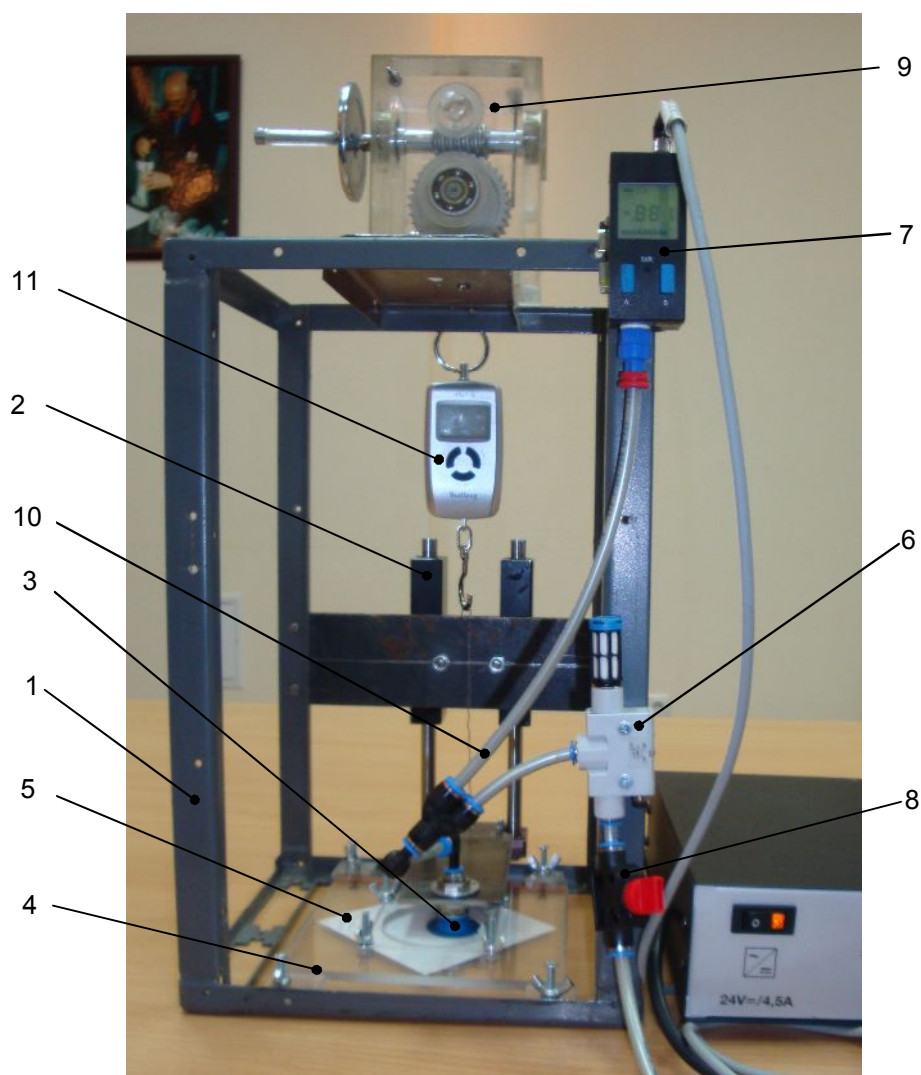
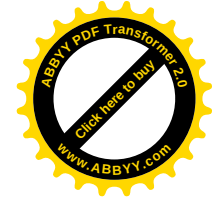


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки для определения усилия удерживания упаковки вакуумными захватами

Установка состоит из рамы 1, направляющей 2 на которой закреплена присоска 3. В нижней части рамы расположены две плиты для крепления исследуемого образца картона. Нижняя плита 4 выполнена перфорированной, а верхняя 5 имеет специальное отверстие и служит для прижатия картонного образца. Для получения вакуума используется вакуумный генератор 6. Контроль значения вакуума в присоске и значения сжатого воздуха в вакуум генераторе осуществляется двумя электронными датчиками давления, соответственно 7 и 8. Перемещения захвата вверх осуществляется механизмом, который состоит из червячного редуктора 9 и системы гибких передач 10. Усилие отрыва (удерживание) измеряется электронным динамометром 11.



Сравнительные результаты исследований усилия отрыва для широко применяемых марок картона приведены в табл 2.

### **Выводы**

1. Проведенные аналитические исследования проникновения воздуха сквозь пористые упаковочные материалы дали возможность получить формулу для определения дополнительного расхода воздуха в вакуумном генераторе, при котором будет обеспечено удержание упаковок во время их перемещения.
2. Получены экспериментальные значения коэффициента воздухопроницаемости для наиболее широко применяемых марок картона. Их можно рекомендовать для практического внедрения во время выполнения проектных расчетов вакуум - захватывающих устройств.
3. Подтверждена адекватность теоретических исследований по определению усилия удерживания вакуумными устройствами пористых материалов.
4. Экспериментально определены значения максимального усилия отрыва для наиболее широко применяемых марок картона.

### **Литература**

1. *Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І., Кохан О.О.* Пакувальне обладнання: Підручник. — К.: ІАЦ «Упаковка», 2010. — 746 с.
2. *Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г.* Основы пневмоавтоматики. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.
3. *Дейч М.Е.* Техническая газодинамика. - М.: - Энергия, 1974. - 592 с.

**А.Н. Гавва**, доктор технических наук  
Н.В. Якимчук, кандидат технических наук,  
Национальный университет пищевых технологий,  
ул. Владимирская 68, г. Киев, Украина