

при работе установки по очистке воздуха от паров этилацетата степень очистки составляет 90 – 95%, а по толуолу – 98% при продолжительности сорбции 30 – 35 часов. Это обусловлено лучшей адсорбционной способностью толуола на угле по сравнению с этилацетатом в области малых концентраций.

При регенерации насыщенного адсорбента водяным паром его активность восстанавливается и не снижается в последующих циклах адсорбционной очистки.

Высокая эффективность очистки воздуха от паров органических растворителей в сочетании с хорошей регенерируемостью адсорбента позволяют спроектировать и более крупные установки по очистке газообразных промвыбросов от вредных органических веществ на углях. При этом мощность установок должна определяться объемом и характером выбросов на конкретных объектах.

УДК 621.762.4

Е.Е.Петюшик, вед.н.с.;  
Д.В.Макарчук, ассистент;  
П.К.Липлянин, доцент

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЖИМАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ СРЕД, ПЕРЕДАЮЩИХ ДАВЛЕНИЕ ПРИ ИЗОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ**

Technique and results of an experimental research of volume change with pressure of elastic materials and the liquids are given. The researches for a range of pressure used in processes isostatic pressing of condensed materials are executed. The legitimacy of use of the offered compression circuit for experiment realization is shown.

Эластичные среды, используемые для передачи давления при реализации способов объемного прессования, испытывают трехосное нагружение. Способность всех эластомеров к высокоэластическим деформациям обуславливает минимальные затраты энергии на их формоизменение. Поэтому в расчетах процессов прессования в эластичных оболочках энергозатраты на упругое формоизменение оболочек можно не учитывать. В то же время в условиях трехосного сжатия эластичные оболочки из полиуретана сжимаемы, что уже существенно сказывается на энергетических и временных характеристиках процессов прессования при давлениях, применяемых для прессования порошковых пористых изделий.

Исследования высокоэластической деформации резины и полиуретана как обратимого изотропного процесса при малых скоростях нагружения приводит к установлению зависимости напряжения-деформации в так на-

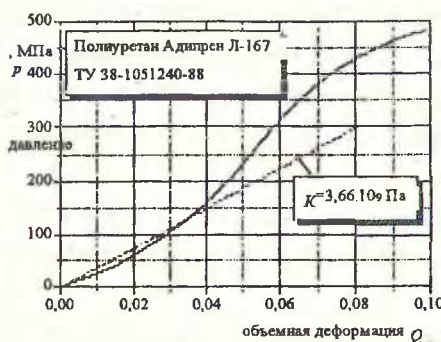


Рис. 1. Зависимость изменения объема полиуретана  $Q = \Delta V/V_0$  от прилагаемого давления  $p$ .

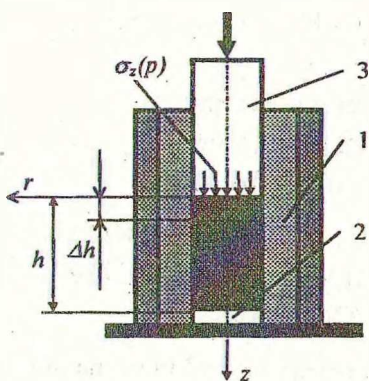


Рис. 2. Схема нагружения образца для исследования сжимаемости.

подчиняющиеся закону Гука, нельзя охарактеризовать постоянным модулем продольной упругости  $E$  и модулем объемного сжатия  $K$ , рассчитываемым из отношения напряжения к деформации. Полученная экспериментально зависимость объемной деформации  $Q$  полиуретана Адипрен Л-167 ТУ 38-1051240-88 от прилагаемого давления  $p$  (рис. 1) подтверждает это положение. Очевидно, что значение модуля сжатия  $K$  для полиуретана не является величиной постоянной и изменяется с изменением давления  $p$ .

Для определения модуля объемного сжатия полиуретана использовалась форма, схема которой представлена на рис. 2, состоящая из матрицы 1, пуансонов нижнего 2 и верхнего 3. Покажем, что такая схема нагружения позволяет получить экспериментально значение модуля сжатия полиуретана.

Для условий одноосного сжатия имеет место

зываемых равновесных условиях [1]. Однако переход эластомеров из исходного (недеформированного) в конечное (деформированное) состояние происходит постепенно, и в конце наблюдения в деформированном образце равновесие еще не наступает. В процессах прессования, даже статических, время нагружения недостаточно велико для установления равновесия в эластичных оболочках, поэтому для статических процессов речь может идти лишь об условно-равновесном состоянии нагруженных оболочек, а для ударного прессования – о неравновесном состоянии, о котором и пойдет речь в дальнейшем.

Материалы, обладающие высокоэластической деформацией – каучук, резина, полиуретан – показывают линейную зависимость между напряжением и деформацией в очень небольших пределах начальных деформаций. В целом, у этих материалов зависимость напряжение-деформация нелинейна. Следовательно, такие материалы, как не

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = 0; \quad \varepsilon_z = -\Delta h / h, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  – соответственно радиальная, тангенциальная и осевая деформации;  $h$  – первоначальная высота образца;  $\Delta h$  – изменение высоты образца при его сжатии.

Таким образом, изменение объема образца равно:

$$Q = \varepsilon_z = -\Delta h / h. \quad (2)$$

Известно выражение для упругого потенциала, используемое применительно к физически нелинейным деформационно-анизотропным материалам [2]:

$$W = \frac{K}{n} \left[ Q + \frac{1}{n} (e^{-nQ} - 1) \right] + \frac{3}{2} G \left\{ 1 + \frac{m}{n} \left[ \hat{Q} + \frac{1}{n} (e^{-n\hat{Q}} - 1) \right] \right\} e_u^2, \quad (3)$$

где  $Q = \varepsilon_{ii}$  – относительное изменение объема;

$\hat{Q} = \frac{1}{V} \iiint Q dV$  – осредненное относительное изменение объема;

$e_u$  – интенсивность касательных напряжений;  $K$  и  $G$  – соответственно модули объемного сжатия и сдвига материала при малых деформациях;  $n$  и  $m$  – постоянные, характеризующие степень нелинейности упругих свойств материала.

Частная производная уравнения (3) по осевой деформации  $\varepsilon_z$  с учетом (2) является выражением для определения осевого напряжения  $\sigma_z$

$$\sigma_z = \frac{K}{n} (1 - e^{-n\frac{\Delta h}{h}}) + \frac{4}{3} G \left\{ 1 + \frac{m}{n} \left[ \hat{\varepsilon}_z + \frac{1}{n} (e^{-n\hat{\varepsilon}_z} - 1) \right] \right\} \varepsilon_z \quad (4)$$

В обобщенных модулях имеем

$$\sigma_z = (K^* + \frac{4}{3} G^*) \varepsilon_z. \quad (5)$$

Переходя к рассмотрению линейной постановки задачи, можно, разлагая  $e^{-n\varepsilon_z}$  в степенной ряд и отбрасывая слагаемые, ввиду малости, получить выражение для линейной теории

$$\sigma_z = (K + \frac{4}{3} G) \varepsilon_z. \quad (6)$$

В случае равномерного гидростатического сжатия образца имеем

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = K \varepsilon_z = -K \cdot \left( \frac{\Delta h}{h} \right). \quad (7)$$



Учитывая, что

$$G = \frac{3}{2} K \frac{1-2\mu}{1+\mu}, \quad (8)$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона для полиуретана, в линейном случае получим

$$\sigma_z = 3K \frac{1-\mu}{1+\mu} \varepsilon_z. \quad (9)$$

Возникает вопрос, можно ли в условиях эксперимента с погрешностью ~5% отличить величину  $K$  от величины  $3K \frac{1-\mu}{1+\mu}$ . При  $\mu=0,49\dots 0,5$  (а это реальные значения коэффициента Пуассона для полиуретанов) различие их составляет менее 3%. Таким образом, в условиях эксперимента не представляется возможным различить величины  $K$  и  $3K \frac{1-\mu}{1+\mu}$ , поэтому полученную из экспериментальных данных величину можно с погрешностью эксперимента считать модулем сжатия полиуретана  $K$ .

Учитывая выражение (6), можно сказать, что для несжимаемого и слабосжимаемого материала  $G \ll K$ , и поэтому величиной  $G$  в условиях эксперимента можно пренебречь, также, как и величиной  $G^*$  при рассмотрении материала как нелинейно сжимающегося.

В этом случае

$$K^* = \frac{K}{n} (1 - e^{-n \frac{\Delta h}{h}}) \varepsilon_z^{-1}; \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{K}{n} (1 - e^{-n \frac{\Delta h}{h}}). \quad (11)$$

Зная величины  $\sigma_z$ ,  $K$ ,  $\varepsilon_z$ , легко определить значение параметра  $n$ .

Образец, выполненный из полиуретана Адипрен Л-167 ТУ 38-1051240-88 с размерами  $\varnothing 16$  мм,  $h$  24 мм, помещался в форму. Производилось осевое сжатие образца на испытательной разрывной машине Instron-1195, на самописце которой фиксировалось перемещение пуансона 3 в зависимости от прикладываемого усилия. Для предотвращения влияния трения на результаты измерений внутренняя поверхность матрицы и пуансоны смазывались водной суспензией фторопласта ФД-4 с концентрацией 61,5% ГОСТ 14906-77 либо дисульфидом молибдена (MoS<sub>2</sub>) ДМ-2 ТУ 48-19-133-85, причем в обоих случаях результаты совпадали. Нагружение

производилось с различными скоростями в пределах возможностей испытательной машины (от 5 мм/мин до 0,4 м/мин). Различия результатов при указанных скоростях нагружения составили не более 0,5%, то есть в указанных пределах скорость нагружения не оказывает влияния на поведение материала, что подтверждает отсутствие вязко-упругих эффектов для объемного модуля полиуретана. Известно, что в расчетах, связанных с ударными и волновыми процессами в высокоэластичных материалах, широко применяется гипотеза об упругом характере объемного модуля [3,4]. Жесткость системы определялась путем нагружения формы без образца.

Для определения модуля сдвига полиуретана  $G$  следует проводить другой опыт, например, на кручение. Однако в силу того, что  $G \ll K$ , модуль сдвига не оказывает существенного влияния на поведение полиуретана при нагружениях. Результаты исследований по определению модуля сдвига ряда эластомеров приведены в работах [3...8].

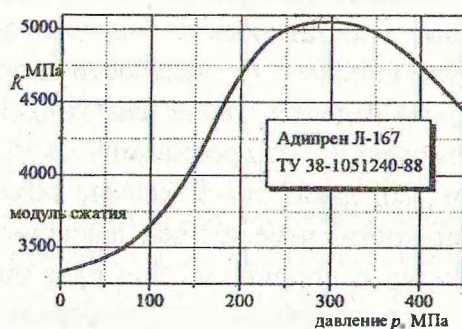


Рис.3 Зависимость модуля сжатия полиуретана от давления .

уретанового образца не изменяется в пределах давлений 0...220 МПа. Это значит, что для описания поведения эластичной оболочки при изостатическом прессовании большого класса порошковых и других уплотняемых материалов достаточно иметь одно выражение, определяющее обобщенный модуль сжатия полиуретана, записывающийся в виде

$$K^* = \frac{K}{n} (1 - e^{-nQ}) Q^{-1}. \quad (12)$$

Практически наиболее часто используют диапазон давлений прессования [10...150 МПа]. С учетом результатов проведенных экспериментов выражение (12) принимает вид

$$K^* = \frac{3,66 \cdot 10^9}{9} (1 - e^{-9Q}) Q^{-1}, \quad (13)$$

где  $K = 3,66 \cdot 10^9$  Па – модуль сжатия полиуретана, полученный при линейной аппроксимации кривой рис.1 на участке до 150 МПа;  $n = 9$ .

Интересно отметить, что относительное уменьшение объема полиуретана при высоких давлениях весьма велико и составляет при давлении  $p = 500$  МПа свыше 10%. Этот факт дает основание полагать, что сжимаемость эластичных оболочек оказывает значительное влияние на энергозатраты процессов прессования, использующих для передачи давления эластичные среды, и на длительность процессов прессования. Последнее в

наибольшей степени сказывается при реализации высокоскоростных процессов прессования (ударных и т.п.).

Устройства, реализующие наиболее распространенные способы изостатического прессования порошковых (в частности пористых) изделий, такие, как гидростатический, гидродинамический и др., содержат значительные объемы жидкости, передающей давление на форму с порошком. Как правило, в

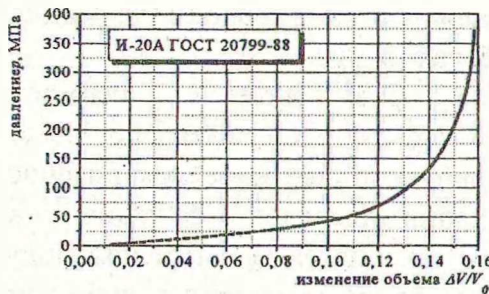


Рис.4 Изменение объема жидкости от давления.

качестве рабочей жидкости используют невакуумированные минеральные масла, воду, глицерин. При высоких давлениях реальные жидкости, в отличие от идеальных, сжимаемы. На рис.4 представлена экспериментальная зависимость изменения объема жидкости от давления. Характерным для жидкостей является существенное уменьшение объема при относительно невысоких давлениях (до 100 МПа). При дальнейшем нагружении объем жидкости изменяется незначительно. Это обстоятельство объясняется тем, что на начальной стадии сжатия уменьшение объема жидкости происходит в основном за счет сжатия растворенного в ней воздуха, а далее поведение реальной жидкости приближается к поведению идеальной.



Очевиден нелинейный характер зависимости давление-деформация для жидкости (масла индустриального И-20 А ГОСТ 20799-88). Для более удобного использования результатов исследования в практических расчетах представляется целесообразным получить зависимость коэффициента сжатия жидкости  $K_v$  от прилагаемого давления  $p$  (рис.5). Характер кривой  $K_v=f(p)$  весьма близок к линейному, что позволяет с достаточной степенью точности аппроксимировать указанную зависимость по методу наименьших квадратов линейной функцией вида

$$K_v = 6,3 \cdot p + 3,27 \cdot 10^7,$$

где  $3,27 \cdot 10^7 = K_v^*$  -- коэффициент сжатия жидкости при  $p \rightarrow 0$ .

В пределах значений давления 0...500 МПа коэффициент сжатия жидкости  $K_v$  изменяется от  $3,27 \cdot 10^7$  до  $3,02 \cdot 10^9$  Па, то есть значительно меньше модуля сжатия полиуретана  $K$ . Это значит, что при одном и том же давлении

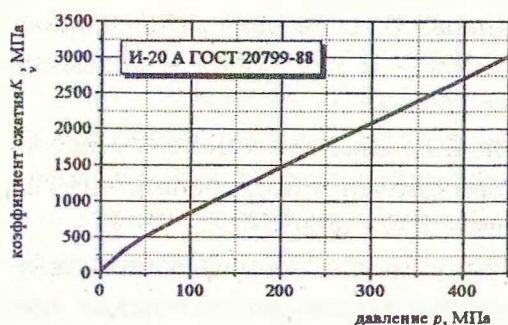


Рис.5. Зависимость коэффициента сжатия жидкости от давления.

жидкость сжимается в большей степени, чем полиуретан, и, следовательно, в большей степени оказывает влияние на энергосиловые и временные характеристики процессов прессования.

Определение коэффициента сжатия жидкости производилось в специальном гидростате. Заправлялось 100 мл масла, причем воздух из герметичной рабочей полости гидростата удаляли через отверстие в поршне.

Таким образом, проведены исследования сжимаемости эластичной и жидкой сред, используемых для передачи давления в процессах изостатического прессования порошковых материалов. Обоснована правомерность использования проведенных экспериментов по определению сжимаемости эластомера. Определено выражение для обобщенного модуля объемного сжатия полиуретана марки Адипрен Л-167 ТУ 38-1051240-88 в явном виде. Установлена зависимость, определяющая значение коэффициента сжатия масла индустриального И-20 А ГОСТ 20799-88, изменяющееся с изменением давления в жидкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лелетов В.А., Юрцев Л.Н. Расчеты и конструирование резинотехнических изделий.: Учеб. пособие для вузов.—3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987.

2. Дымников С.И., Воловик А.А., Яковлев В.В. Вариационная постановка физически нелинейных задач расчета тонкослойных эластомерных упругих элементов. - В кн.: Вопросы динамики и прочности. - Рига, 1987. - вып. 48. - С. 72 - 86.
3. Москвитин В.В. Соппротивление вязко-упругих материалов. - М.: Наука, 1972.
4. Колтунов М.А., Майборода В.П., Зубчанинов В.Г. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов. - М.: Машиностроение, 1983.
5. Лавендел Э.Э., Лейканд М.А., Хричикова В.А. Расчет сжатия тонкослойных резинометаллических элементов. - В кн.: Вопросы динамики и прочности. - Рига, 1981, вып. 38. - С. 57-63.
6. Лавендел Э.Э., Лейканд М.А., Львов С.В. Экспериментальное исследование изменения объема резины при сжатии и растяжении. - В кн.: Вопросы динамики и прочности. - Рига, 1981, вып. 38. - С. 49-53.
7. Ривин Е.И., Аронштам Л.И. Экспериментальные исследования статической жесткости и сдвига тонкослойных резино-металлических элементов // Каучук и резина. - 1969. -- №7. - С.18-21.
8. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. - Л.:Химия, 1977.

УДК 66.001.5.045.048

В.А. Марков, доцент;

А.М. Волк, доцент

### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

The work deals with the results of the calculation of characteristics of a liquid film which leaks on internal and external vertical cylindrical surfaces under the influence of gravity and the gas stream force. The influence of physical properties of a liquid and geometrical parameters on distribution of local speeds in the thickness of a film is observe. The comparative estimation of the results of account for the cylindrical and flat surfaces is given.

Пленочное течение жидкости, как известно, широко используется в тепло-массообменных аппаратах для интенсификации процессов взаимодействия фаз, в сепараторах для мокрой очистки газовых потоков от взвешенных твердых частиц, в различных сепарационных устройствах для отделения капельной жидкости и т.п. Несмотря на ряд фундаментальных исследований, проведенных П.А. Капицей, П.А. Семеновым, Г. Уоллисом, И.В. Доманским [1-4] и другими исследователями, расчет характеристик пленки жидкости требует зачастую проведения дополнительных исследо-