

ВСЕСОЮЗНЫЙ  
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

*ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ*  
**ЖУРНАЛ**

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК



ИЮЛЬ, ТОМ 59, № 1

МИНСК · 1990

В. Н. Аврашков, С. И. Барановский, А. А. Клушин, В. М. Левик

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СНОСЯЩЕМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Можно выделить два типа условий использования распыливающих устройств: в не подвижном объеме воздуха (газа) и при наличии обдува потоком газа. Во втором случае появляется возможность использовать аэродинамическое воздействие сносщего потока на струю жидкости.

В данной работе рассмотрены три способа распыливания жидкости в условиях поперечного сносщего потока с целью получения сравнительных характеристик.

Использовались струйная и пневматическая коаксиальная форсунки. Струйная форсунка была выполнена в торце консольного «микропилон» и представляла собой отверстие  $\varnothing 0,6$  мм с коэффициентом расхода  $\mu_r = 0,628$ . Под микропилоном подразумевается устройство, состоящее из одной либо нескольких расположенных в ряд вплотную друг к другу трубочек малого диаметра (1,5—0,8 мм). Такая конструкция позволяет вынести необходимое число форсунок практически в любую точку сносщего потока за счет выбора числа микропилонов, длин составляющих его трубочек, а также диаметров и положения инжекторов в них. В экспериментах использовался микропилон поперечной толщины 1,5 мм высотой 15 мм. С помощью микропилон в поток инжектировался как просто жидкий керосин (при этом реализовался струйный тип распыла), так и насыщенный пузырьками воздуха, для чего керосин предварительно пропускался через смеситель. Такой тип распыла назван барботажным. Параметры пневматической форсунки были следующие: диаметр канала топливной иглы 1,0 мм, диаметр среза конического воздушного сопла 2,2 мм.

В сносящий поток воздуха, истекающего из профилированного сопла со срезом прямоугольной формы и размером сторон  $100 \times 50$  мм, устанавливалась плоская стенка с закрепленными на ней микропилоном или пневматической форсункой. Скорость сносщего потока изменялась от 40 до 580 м/с. Статическое давление в потоке равнялось атмосферному, температура потока лежала в пределах 290—450 К. Верхнее значение температуры поддерживалось при сверхзвуковой скорости потока. Измерения проводились методом «лазерной иглы» [1] на расстоянии, равном 150 калибрам инжектора вниз по потоку от его оси.

Результаты экспериментов показали, что при струйном и барботажном способе распыла скорость сносщего потока значительно влияет на размеры капель в диапазоне скоростей до  $\sim 250$  м/с.

Пневматическая форсунка обеспечивала постоянный средний размер капель во всем исследованном диапазоне скоростей потока. При скоростях потока выше 250 м/с все три способа распыла позволили получить постоянную величину среднего размера капель порядка 16 мкм.

Результаты измерений полей объемной концентрации жидкой фазы в струях показали, что наиболее равномерное поле получается при инжекции в поток барботированного керосина.

Получен эффект увеличения глубины проникновения струи жидкости за счет барботирования. Существенный результат достигается уже при  $\sim 0,5$ — $1,5\%$ -ной добавке воздуха.

Проведен анализ механизма дробления струй и дано объяснение полученных результатов.

### Литература

1. Аврашков В. Н., Барановский С. И., Николенко В. П. // IV Всесоюз. школа по методам аэрофизических исследований. Новосибирск, 1986. С. 74.

Статья депонирована в ВИНТИ 19.02.90, рег. № 982—В90. (Статья поступила в редакцию 13.01.89, аннотация — 09.02.90. Полный текст 0,3 а. л., библиогр. 3 назв.)

УДК 532.135 : 541.148

В. Г. Пономаренко, Г. Ф. Потемля, Л. М. Ульев,  
А. А. Житинкин, О. А. Ольховиков

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО КАПИЛЛЯРНОГО ВИСКОЗИМЕТРА

В работе изложен метод определения реологических параметров вязких и вязкопластических жидкостей с помощью интегральной обработки экспериментальных данных, полученных на автоматическом капиллярном вискозиметре.

Реологические свойства находятся из условия минимума среднеквадратичного отклонения между экспериментальной кривой движения поршня вискозиметра и кривой, полученной из решения соответствующей изотермической гидродинамической задачи для различных температур жидкости.

Выбирая для обработки различные участки экспериментальных кривых, можно получить в принципе неограниченный набор значений реологических параметров для каждой температуры. Далее, считая эти значения экспериментальными данными, строим линии регрессии для аррениусовской зависимости вязкости от температуры и определяем энергии активации вязкого и пластического течения.

В качестве примера обработаны эксперименты с расплавами термопластичных полиуретанов (ТПУ). Установлено, что марки ТПУ клевого назначения в практически важном диапазоне скоростей сдвига ведут себя, как высоковязкие ньютоновские жидкости, а более жесткие марки ТПУ, — как бингамовские жидкости с зависимостью реологических свойств от температуры:

$$\mu_p = \mu_{p0} \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right];$$

$$\tau_0 = \tau_{00} \exp \left[ \frac{E_\tau}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right],$$

где  $T_0 = 473$  К,  $E \sim 10^5 - 10^7$  Дж/моль,  $E_\tau = 10^4 - 10^6$  Дж/моль,  $\mu_{p0} \sim 10^3$  Па·с,  $\tau_{00} \sim 10^2 - 10^5$  Па.

Сравнение экспериментальных кривых отклонения поршня и рассчитанных с помощью найденных соотношений в области практически интересных скоростей сдвига дает отклонение не более 1%. Отметим, что такая же методика может применяться для исследования реологических свойств и у других неньютоновских жидкостей.

### Обозначения

$E$ ,  $E_\tau$  — энергии активации вязкого и пластического течения, Дж/моль;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  — температура, К;  $\mu_p$  — пластическая вязкость, Па·с;  $\tau_0$  — предельное напряжение сдвига, Па.

Статья депонирована в ВИНТИ 05.03.90, рег. № 1224—В90. (Статья поступила в редакцию 31.07.89, аннотация — 13.02.90. Полный текст 0,35 а. л., библиогр. 10 назв.)

УДК 536.2

Г. Т. Гасанов, Д. Я. Назиев, Н. С. Алиев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕКОТОРЫХ ВЫСШИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ

Методом цилиндрического трикалориметра измерены теплопроводности изооктана (2,2,4-триметилпентан) в интервале температур 192,15—621,15 К и октана-1 в интервале 200,56—556,10 К при давлениях до 100 МПа.

При вычислении теплопроводности, согласно расчетному уравнению трикалориметра, вводились поправки на потери тепла с радиацией для жидкостей и газа, через центрирующие штыри, с торцов измерительного цилиндра и поправка на переменность теплофизических характеристик вещества.

Дано сравнение полученных опытных данных с литературными.

Для обобщения опытных данных по теплопроводности  $\lambda$  изооктана и октана-1, а также  $n$ -октана использовано полуэмпирическое уравнение Эискога, модифицированное Вакехамом:

$$\lambda^* = \frac{64}{75} \left( \frac{M\pi}{k^3 T} \right)^{1/2} \frac{2^{1/3} V^{2/3} \lambda}{N^{2/3}} = f \left( \frac{V}{V_0} \right). \quad (1)$$

Для определения удельного характеристического объема  $n$ -алканов предложено выражение

$$10^3 v_0 = B \{ 0,968 + 5,688 \cdot 10^{-8} [(T - 350)^2]^{1,2925} \}, \quad (2)$$

где  $B = 1 + \frac{300 - T}{T_n} \beta$ ;  $\beta = 0,1938$ .

Вычислено  $v_0$  также для изооктана и октана-1.

Согласно (1), была вычислена приведенная теплопроводность  $n$ -октана в зависимо-

Академия наук БССР

Редакция Инженерно-Физического журнала

УДК 532.135:541.148

№ 1224-890

В.Г.Пономаренко, Г.Ф.Потебня, Л.М.Ульев, А.А.Житинкин,  
О.А.Ольховиков

Определение реологических свойств высоковязких жидкостей  
с помощью автоматического капиллярного вискозиметра

Минск - 1990

Технологические свойства полимеров оказывают значительное влияние на процессы их переработки [1]. Поэтому от точности их определения зависят правильность расчета конструкций соответствующего оборудования и выбора эффективных условий его эксплуатации. Например, при выборе оптимальных режимов гранулирования термопластичных полиуретанов потребовалось знание реологических свойств расплавов ТПУ в широком интервале температур [2-4].

Вследствие сильной зависимости вязкости расплавов ТПУ от температуры [5] (изменение температуры на несколько процентов может привести к изменению вязкости на несколько порядков) для определения реологических характеристик расплавов необходимы реометрические приборы, работающие в большом диапазоне напряжений сдвига. К таким приборам относится автоматический капиллярный вискозиметр АКВ-5, пружины которого позволяют создавать напряжения сдвига от 0 до  $3 \cdot 10^5$  Па. С его помощью можно определять свойства как чисто вязких [6], так и вязкопластичных материалов. Принцип работы вискозиметра АКВ-5 заключается в продавливании жидкости через капилляр поршнем под воздействием сжатой пружины. Отклонение поршня от начального положения автоматически записывается на движущейся бумажной ленте (рис.1).

Обычно реологические параметры определяют по кривой течения [1,6], которая строится с помощью дифференцирования кривой отклонения поршня. Но графическое дифференцирование (согласно инструкции к АКВ) дает большие погрешности из-за случайных ошибок и точности считывания данных, а при дифференцировании функции, аппроксимирующей кривую отклонения, точность еще ухудшится. В то же время известно, что при интегрировании аппроксимирующей и исходной функции погрешности описания существ-

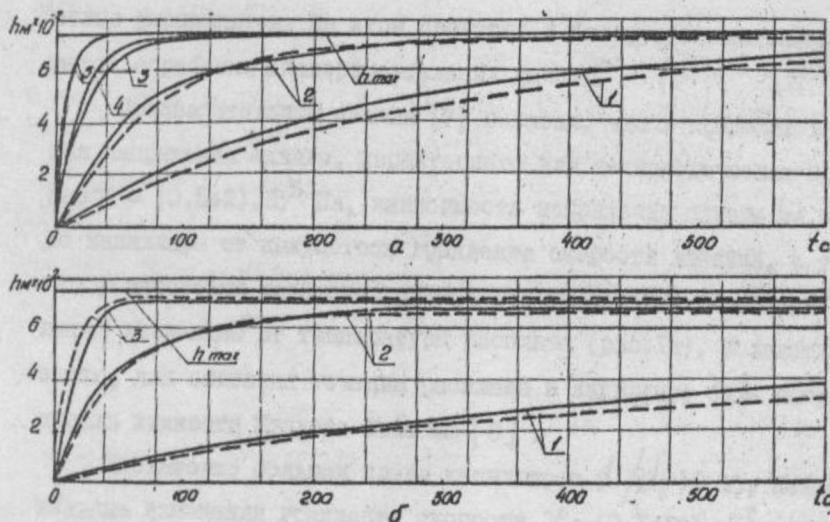


Рис. I. Отклонение поршня вискозиметра в зависимости от времени:

а) для расплава ТЛУ-12; 1 - температура расплава  $T = 373$  К,  $d_k = 2,117 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,32 \cdot 10^{-2}$  м; 2 -  $T = 393$  К,  $d_k = 2,117 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,32 \cdot 10^{-2}$  м; 3 -  $T = 413$  К,  $d_k = 2,117 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,32 \cdot 10^{-2}$  м; 4 -  $T = 433$  К,  $d_k = 1,326 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,73 \cdot 10^{-2}$  м; 5 -  $T = 473$  К,  $d_k = 1,326 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,73 \cdot 10^{-2}$  м.

б) для расплава ТЛУ-14; 1 -  $T = 433$  К,  $d_k = 2,117 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,32 \cdot 10^{-2}$  м; 2 -  $T = 453$  К,  $d_k = 2,117 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,32 \cdot 10^{-2}$  м; 3 -  $T = 473$  К,  $d_k = 1,326 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 4,73 \cdot 10^{-2}$  м.

Сплошные линии - экспериментальные кривые, штриховые - расчетные,  $h_{max}$  - максимально возможное отклонение поршня.

венно уменьшаются. На этом свойство и базируется используемый метод обработки экспериментальных данных.

Предварительный анализ [7] показал, что в пределах изменения напряжения сдвига, характерного для технологических процессов  $\tau \sim (0,5+2) \cdot 10^5$  Па, зависимость напряжения сдвига на стенке капилляра от кажущегося градиента скорости линейна, а также, что у некоторых расплавов существует предельное напряжение сдвига, зависящее от температуры расплава (рис.1а). Вследствие этого, для описания течения расплава в капилляре была выбрана модель жидкости Шведова-Бингама [8].

Достаточно большая длина капилляров ( $L/d_k > 40$ ), незначительные изменения градиента скорости  $\dot{\gamma} \sim (0,1+10) \text{ с}^{-1}$  в практически интересной области напряжений сдвига, отношения диаметров поршня и капилляра  $d_n/d_k > 10$ , термостатирование и значительные величины коэффициентов вязкости позволили сделать следующие допущения при обработке экспериментальных данных:

1) пренебрегаются концевыми эффектами; 2) температура жидкости полагается везде постоянной и одинаковой; 3) течение жидкости в любой момент времени считается установившемся; 4) пренебрегаются потерями энергии в резервуаре.

При течении высоковязких жидкостей через капилляры числа Рейнольдса обычно очень малы. Действительно, оценка максимального значения  $Re$  расплава полимера ППУ по средней скорости  $v = dh(t)/dt$ , эквивалентной вязкости [8]  $\mu_{\text{экв}} = \Delta P d_k^2 / 32 L \bar{v}^2$  и плотности  $\rho \sim 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , дает  $Re \sim 10^{-5}$ . При таком значении  $Re$  силами инерции по сравнению с вязкими силами можно пренебречь, и определить приращение объема жидкости, протекшей через капилляр при заданном изменении давления во времени, используя формулу Букингема - Рейнера [9]:

$$\Delta V(t) = \frac{\pi d_k^4}{\mu_p} \left\{ \frac{1}{128} \int_{t_0}^t \Delta p(t) dt - \frac{1}{24} \frac{\tau_0}{d_k} (t-t_0) + \frac{2}{3} \frac{\tau_0^4 L}{d_k^4} \int_{t_0}^t \frac{dt}{\Delta p^3(t)} \right\}, \quad (1)$$

где  $\Delta p(t) = \alpha - \beta h(t)$ .

С другой стороны  $\Delta V(t)$  можно определить без учета реологических свойств жидкости:

$$\Delta V(t) = \frac{\pi d_n^2}{4} [h(t) - h(t_0)] \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим для любого, в пределах эксперимента, значения времени  $t = t_i$

$$\Delta h_i = \frac{1}{\mu_p} \left( \beta_{0i} + \beta_{1i} \tau_0 + \beta_{2i} \tau_0^4 \right), \quad (3)$$

где

$$\Delta h_i = h(t_i) - h(t_0); \quad \beta_{0i} = \frac{d_k^4}{32 L d_n^2} \int_{t_0}^{t_i} \Delta p(t) dt;$$

$$\beta_{1i} = - \frac{d_k^3 (t_i - t_0)}{6 d_n^2}; \quad \beta_{2i} = \frac{8 L^3}{3 d_n^2} \int_{t_0}^{t_i} \frac{dt}{\Delta p^3(t)}$$



Заметим, что зависимость (3) можно получить также из равенства работы, произведенной пружиной, и энергии, диссипировавшей в объеме канала капилляра.

Уравнение (3) для каждого  $t_i$  содержит две неизвестные величины  $\mu_p$  и  $\tau_0$ , количество же таких уравнений для каждого эксперимента, в принципе, неограничено, так как известна функция  $h(t)$ , аппроксимирующая экспериментальную кривую удлинения пружины  $h_3(t)$  (рис.1). В данном случае  $h(t)$  получали с помощью метода наименьших относительных квадратов [10] с автоматическим выбором степени аппроксимации. Пластическая вязкость и предельное напряжение сдвига определялись из минимума суммы квадратов относительных отклонений  $\Delta h_i$ , полученных из (3), от  $\Delta h_i$ , полученных из аппроксимирующей функции  $h(t)$ . Разбивая обрабатываемый интервал кривой отклонения поршня на  $N$  частей, получим:

$$F(\mu_p, \tau_0) = \sum_{i=1}^N \left[ 1 - \frac{1}{\mu_p \Delta h_i} (\beta_{0i} + \beta_{1i} \tau_0 + \beta_{2i} \tau_0^2) \right]^2 \quad (4)$$

Как известно, необходимым условием минимума дифференцируемой положительно определенной функции двух переменных является выполнение равенств:

$$\frac{\partial F}{\partial \mu_p} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau_0} = 0. \quad (6)$$

Систему уравнений (5), (6) стандартными процедурами МКК решить нельзя, так как неизвестные  $\mu_p$  и  $\tau_0$  входят туда нелинейно.

Подставляя (4) в (5) и (6), и разрешая полученные уравнения относительно  $\mu_p$ , получим выражения:

$$\mu_p = \frac{\sum_{K=0}^8 S_K \tau_0^K}{\sum_{K=0}^4 C_K \tau_0^K} ; \quad (7)$$

$$\mu_p = \frac{\sum_{K=0}^8 K S_K \tau_0^{K-1}}{2 \sum_{K=0}^4 K C_K \tau_0^{K-1}} , \quad (8)$$

где

$$S_0 = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{0i}^2}{\Delta h_i^2} ; S_1 = 2 \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{0i} \theta_{1i}}{\Delta h_i^2} ; S_2 = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{1i}^2}{\Delta h_i^2} ;$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{0i} \theta_{4i}}{\Delta h_i^2} ; S_5 = 2 \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{1i} \theta_{4i}}{\Delta h_i^2} ; S_8 = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{4i}^2}{\Delta h_i^2} ;$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{0i}}{\Delta h_i} ; C_1 = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{1i}}{\Delta h_i} ; C_4 = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{4i}}{\Delta h_i} ;$$

$$S_3 = S_6 = S_7 = C_2 = C_3 = 0.$$

Из (7) и (8) получим нелинейное уравнение для определения  $\tau_0$  :

$$2 \left( \sum_{K=0}^8 S_K \tau_0^K \right) \left( \sum_{K=0}^4 K C_K \tau_0^{K-1} \right) - \left( \sum_{K=0}^8 K S_K \tau_0^{K-1} \right) \left( \sum_{K=0}^4 C_K \tau_0^K \right) = 0, \quad (9)$$

которое можно решить традиционными численными методами.

Выбирая различные значения  $t_0$  и  $t_N$ , получим разные наборы пар значений  $\tau_0$  и  $\mu_p$  для эксперимента при одной и той же температуре расплава и, рассматривая их как данные, полученные на эксперименте, построим линии регрессии для зависимостей:

$$\ln \mu_p = \ln \mu_{p0} + \frac{E_\mu}{R} \frac{1}{T}; \quad (10)$$

$$\ln \tau_0 = \ln \tau_{00} + \frac{E_\tau}{R} \frac{1}{T}. \quad (11)$$

Для расплавов, у которых на опыте не наблюдались предельные напряжения сдвига (рис.1а),  $\tau_0$  располагались вблизи 0. Проверка показала, что в этом случае с большой точностью можно положить  $\tau_0 = 0$ , а вязкость определять из (9) и строить линию регрессии по (10). Линии регрессии приведены на рис.2.

В результате обработки экспериментов с расплавом клевого ПНУ-12 с характеристической вязкостью  $[\eta] = 0,051 \text{ м}^3/\text{кг}$  получены зависимости:

$$\mu = \mu_0 \exp \left[ \frac{E_\mu}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]; \quad (12)$$

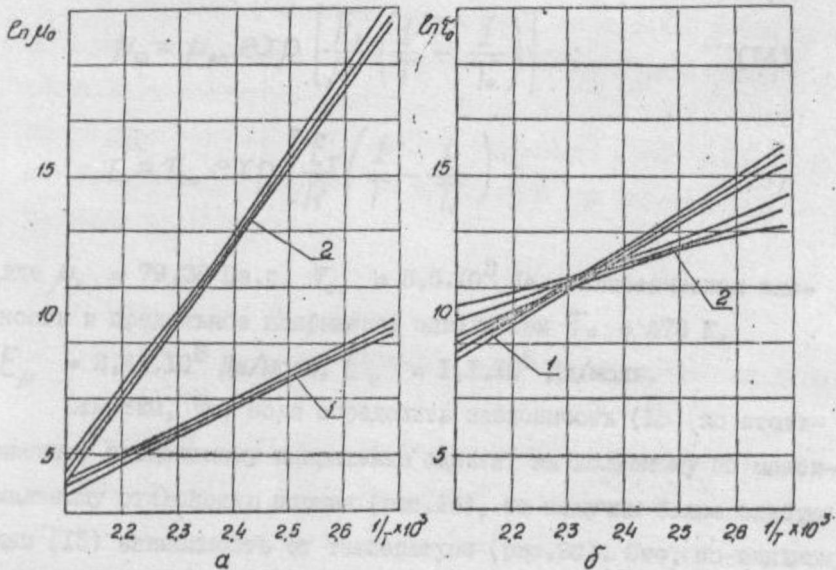


Рис.2. Линии регрессии с 95 % коридором ошибок.

- а) 1 - для пластической вязкости; 2 - для ньютоновской вязкости.
- б) 1 - для динамического предельного напряжения сдвига,  
2 - для статического предельного напряжения сдвига.

$$\tau_0 = 0,$$

(13)

где  $\mu_0 = 50$  Па·с -- вязкость при  $T_0 = 473$  К,  $E_\mu = 8,3 \cdot 10^4$  Дж/моль.

Для расплавов более жестких ПУ-14 с  $[\eta] = 0,073 \text{ м}^3/\text{кг}$ :

$$\mu_p = \mu_{p0} \exp \left[ \frac{E_\mu}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]; \quad (14)$$

$$\tau_0 = \tau_{00} \exp \left[ \frac{E_\tau}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (15)$$

где  $\mu_p = 79,38 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\tau_{00} = 5,5 \cdot 10^3 \text{ Па}$  — пластическая вязкость и предельное напряжение сдвига при  $T_0 = 473 \text{ К}$ ,

$E_\mu = 2,41 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$ ,  $E_\tau = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$ .

Отметим, что если определить зависимость (15) по статическому предельному напряжению сдвига, вычисляемому по максимальному отклонению поршня (рис.16), то получим более слабую, чем (15) зависимость от температуры (рис.26). Это, по-видимому, следствие нелинейности кривой течения при малых скоростях сдвига, но, как отмечалось выше, для практических расчетов интересен линейный участок кривой течения, в пределах которого и получены выражения (12-15).

Для проверки адекватности полученных зависимостей экспериментальным данным, выражение (3) запишем в дифференциальной форме и проинтегрируем его, учитывая, что при  $t = 0$ ,  $h = 0$ .

И тогда, например, для (12) и (13) получим:

$$h(t) = \frac{d}{\beta} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{d_k^4 \beta}{32 \mu L d_n^2} t \right) \right], \quad (16)$$

что дает хорошее совпадение с экспериментальными кривыми. Аналогично проверяя (14) и (15), когда  $\tau_0 \neq 0$ , также получаем хорошее совпадение с опытом (рис.1), относительное среднеквадратичное отклонение для области с линейной кривой течения не бо-

лее I %, а при обработке всей кривой отклонения поршня - (10+15) %.

В заключение заметим, что данный метод также можно применять для определения реологических свойств псевдопластичных и обобщенных нелинейно-вязкопластичных сред. В этих случаях изменится выражение (I); и в систему уравнений (5-6) необходимо будет добавить производные по дополнительным параметрам в реологических уравнениях.

#### Обозначения

$d$  - диаметр, м;  $E_{\mu}$  - энергия активации вязкого течения, Дж/моль;  $E_{\tau}$  - энергия активации пластического течения, Дж/моль;  $h(t)$  - расстояние, пройденное поршнем за время  $t$ , м;  $L$  - длина капилляра, м;  $\Delta P$  - перепад давления на длине капилляра, Па;  $R = 8,314$  Дж/моль.К - универсальная газовая постоянная;  $t$  - время, с;  $t_0$  - начальная точка обработки экспериментальных данных, с;  $T$  - температура, К;  $\alpha$  - максимальное усилие, создаваемое пружиной, Н;  $\beta$  - жесткость пружины, Н/м;  $\dot{\gamma}$  - градиент скорости,  $s^{-1}$ ;  $[\eta]$  - характеристическая вязкость,  $m^3/kg$ ;  $\mu_p$  - пластическая вязкость, Па.с;  $\mu$  - ньютоновская вязкость, Па.с;  $\rho$  - плотность,  $kg/m^3$ ;  $\tau$  - напряжение сдвига, Па;  $\tau_0$  - предельное напряжение сдвига, Па;  $\sum$  - символ суммирования.

Индексы: к - капилляр; п - поршень; э - эксперимент.

#### Литература

1. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. Л., 1983.
2. Пономаренко В.Г., Потехина Г.Ф., Ульев Л.М. // Пром. теплотехника. 1985. Т.7, № 1. С.9-16.

3. Пономаренко В.Г., Хитинкин А.А., Потебня Г.Ф., Ульев Л.М.// Пром.теплотехника. 1986.Т.8, № 3. С.55-58.
4. *Ponomarenko V.G., Potebnya G.F., Ulijev L.M. // Fluid mechanics. Soviet reseach. 1985. Vol. 14, No 4. P. 40-50.*
5. Ананьев В.К., Малинин Л.Н., Владимиров Ю.И., Страхов В.В.// Пластические массы. 1981. № 8. С.45-46.
6. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. М., 1979.
7. Мирзаджанзаде А.Х., Отгбалов П.М.//Механика полимеров.1976. № 4. С.707-717.
8. Смольский Б.М., Шульман З.П., Гореславец В.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно-вязкопластичных материалов. Минск., 1970.
9. Рейнер М. Реология. М., 1965.
10. Голованчиков А.Б., Тябин Н.В.//ИФЖ,1981.Т.41, № 1. С.70-73. Украинский научно-исследовательский институт химического машиностроения.