

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ НАПОРНЫХ ПОТОКОВ ОБМАЗОЧНЫХ МАСС ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

А.Е. МАРЧЕНКО

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича (Боженко),  
11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С применением капиллярного вискозиметра постоянных расходов, представленного в виде внезапно сужающегося ступенчатого канала, и испытательной машины INSTRON 1251, моделированы процессы напорного течения обмазок для сварочных электродов в прессовой камере и в фильерном пространстве производственных электрообмазочных прессов. Термопарными замерами изучена тепловая обстановка в предкапиллярной зоне, а методом визуализации — структура потока в ней. С использованием математического аппарата, разработанного для вычисления реологических характеристик полимерных материалов в состоянии вязкоупругого напорного потока, рассчитаны аналогичные показатели двух видов обмазок для низководородных электродов, изготовленных с применением одна — вязкого, другая — низковязкого жидкого стекла. Зерновой состав их наполнителя одинаков. Вычислены значения вязкоупругих показателей обмазок, включая сдвиговую и продольную вязкость, упругий потенциал, первую разность и коэффициент первой разности нормальных напряжений, а также период релаксации. Проанализированы и прокомментированы их зависимости от геометрических размеров ступенчатых каналов и величины объемного расхода обмазки при капиллярных измерениях с учетом суспензионной природы обмазок, а также стойкости формируемых в них напорных потоков против вязкоупругой нестабильности. Библиогр. 12, табл. 3, рис. 12.

*Ключевые слова:* реология, сварочные электроды, обмазки для покрытий низководородных электродов, вязкоупругие характеристики обмазок, нестабильности напорных потоков

На пути из рабочего цилиндра электрообмазочного пресса в калибрующую фильеру, в которой обмазочная масса обволакивает металлические прутки, сечение ее потока уменьшается, а скорость возрастает в десятки раз. При этом существенно изменяются свойства обмазки, от которых зависит качество изготовления и рабочие характеристики сварочных электродов. Какие из них, в какой степени, и каким образом эти изменения происходят, не было достоверно установлено в течение многих лет. В сущности, из-за этого оставалась неясной сама физико-химическая природа обмазочных масс. Работа, опубликованная 65 лет назад [1], хотя и не раскрывала эту природу, тем не менее, объективно позволяла судить о том, что сделать это, основываясь только на представлениях о вязкости электродных обмазок, невозможно.

С использованием подходов коллоидного материаловедения и инженерной реологии, в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины на протяжении последних 10–15 лет было выяснено, что электродные обмазочные массы, как и другие виды высококонцентрированных суспензий жестких частиц в вязкой жидкой среде, наряду с вязкостью характеризуются упругими свойствами. Для полного описания их реологических свойств должны использоваться не только сдвиговая, продольная вязкости, но и ряд показателей упругости.

© А.Е. Марченко, 2016

Упругая составляющая прежде всего существенно повышает энергетические затраты на организацию напорного течения обмазок с целью их нанесения на электродные прутки. Наряду с этим, определенными сочетаниями показателей вязкости и упругости обмазок вызывается их нестабильное течение. При опрессовке сварочных электродов это приводит к разной толщине покрытия, резко ухудшающей технологические свойства электродов. Указанная нестабильность, как правило, возникает в переходные стадии формирования потока, пока он, проходя формирующие каналы в головке электрообмазочного пресса или в измерительной ячейке капиллярного вискозиметра, вслед за изменением сечения, направления или скорости выходит на стационарный режим течения. Местом ее возникновения может быть и капилляр, и предшествующая ему зона [2–4].

Для экспериментального изучения причин или математического моделирования условий, провоцирующих появление нестабильностей напорных потоков обмазочных масс, следует, как и в реологии полимеров, использовать модель ступенчатого канала, на первый случай, прямого типа. В нем сечение потока при переходе из резервуара (расходного цилиндра) в фильеру (или капилляр) уменьшается внезапно (ступенчато) или, реже, постепенно суживаясь. При этом поток ускоряется либо увеличением степени редуцирования струи

при неизменном темпе нагнетания обмазки в фильере, либо путем повышения скорости плунжера при неизменной степени редуцирования.

В настоящей работе изложены результаты выполненных в ИЭС им Е.О. Патона исследований напорного течения электродных обмазочных масс через круглые прямоточные ступенчатые каналы. Цель исследований — выяснить, в какой мере геометрия каналов и приемы регулирования режимов течения влияют на температуру, структуру, реологические параметры и показатели стабильности напорных потоков электродных обмазочных масс.

**Методы и объекты исследования.** Реологические свойства электродных обмазочных масс исследовались в основном с применением капиллярного вискозиметра ОБ 1435 — экструдера постоянных расходов с электромеханическим приводом. Величина расхода регулируется ступенчато сменой шестерен и капилляров [5]. В заводской модели вискозиметра при диаметре штатного рабочего цилиндра (резервуара)  $D_R = 30$  мм расход регулируется в пределах от 1 до  $25 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Пользуясь капиллярами с диаметром  $d_c = (2 \dots 6)$  мм, средний градиент скорости сдвига можно задавать в пределах от 1 до  $8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Для достижения целей запланированных исследований этого было недостаточно. Чтобы расширить диапазон градиентов скорости сдвига  $\dot{\gamma}_c$  в сторону режимов течения ползучести ( $Q < 1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\dot{\gamma}_c$  до  $0,1 \text{ с}^{-1}$ ), наряду со штатным использовались резервуары

с диаметром 15 и 10 мм. Выполняемые при этом реологические измерения включали и заходную, и капиллярную зоны. Экструдирова обмазку через отверстия с диаметром 2, 4 и 6 мм в плоском диске толщиной 1 мм, измеряли сопротивление заходной зоны  $P_0$ . Используя капилляры с приведенной длиной  $L = 10d_c$ , оценивали суммарные потери давления в измерительной ячейке, включающей заходную зону и капилляр. По значениям  $P_0$  и  $(P_L - P_0)$ , вычисляли нужные реологические показатели обмазок, характеризующие их технологические свойства, а именно:

- сдвиговое  $\tau$ , продольное  $\sigma_{cp}$  напряжения, а также первую разность нормальных напряжений  $\sigma_1$ ;
- развиваемые этими напряжениями сдвиговую  $\eta$ , продольную  $\lambda$  вязкости и коэффициент нормальных напряжений  $\xi$ ;
- угол естественной конвергенции  $\alpha_0$ ;
- период релаксации упругих напряжений  $\theta$ ;
- нормированное по  $\tau$  значение первой разности нормальных напряжений  $\sigma_1/\tau$ .

Градиент скорости и напряжение сдвига вычисляли по формулам  $\dot{\gamma}_c = 8Q/\pi d_c^3$  и  $\tau = (P_L - P_0)d_c/4L$ . Методики измерений и вычислений, названных выше, а также других реологических показателей, используемых в настоящей работе, подробно изложены в работах [2, 4, 5].

Полный план и результаты экспериментов приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** План и результаты экспериментов, использованных для расчетов реологических характеристик обмазочных масс С2 и Н2

$d_c$ , мм	$D_R/d_c$	$Q$ , $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	$P_0$ , МПа	$P_L$ , МПа	$D_R = 10$ мм			$D_R = 15$ мм			$D_R = 30$ мм		
					$Q$ , $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	$P_0$ , МПа	$P_L$ , МПа	$Q$ , $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	$P_0$ , МПа	$P_L$ , МПа	$Q$ , $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	$P_0$ , МПа	$P_L$ , МПа
Обмазка С2													
2	5,0	0,11	18,0	45,0	7,5	0,25	24,0	46,0	15,0	1,0	10,0	30,0	
		0,57	18,0	63,0		1,28	26,0	50,0		5,1	15,0	40,0	
		1,70	27,0	72,0		3,82	12,0	52,0		15,3	18,0	54,0	
4	2,5	<b>0,11</b>	<b>27,0</b>	<b>72,0</b>	3,75	<b>0,25</b>	<b>12,0</b>	<b>32,0</b>	7,5	<b>1,0</b>	<b>8,0</b>	<b>22,0</b>	
		0,57	27,0	90,0		1,28	16,0	32,0		5,1	10,0	34,0	
		<b>1,70</b>	<b>45,0</b>	<b>99,0</b>		<b>3,82</b>	<b>20,0</b>	<b>40,0</b>		<b>15,3</b>	<b>11,0</b>	<b>44,0</b>	
6	1,7	0,11	18,0	56,0	2,5	0,25	8,0	36,0	5,0	1,0	6,0	22,0	
		0,57	18,0	59,0		1,28	12,0	36,0		5,1	8,0	22,0	
		1,70	36,0	72,0		3,82	12,0	36,0		15,3	10,0	32,0	
Обмазка Н2													
2	5,0	0,11	16,0	31,5	7,5	0,25	24,0	32,0	15,0	1,0	16,5	26,0	
		0,57	16,0	31,8		1,28	20,0	36,0		5,1	16,5	35,0	
		1,70	16,0	45,0		3,82	16,0	46,0		15,3	19,5	41,0	
4	2,5	<b>0,11</b>	<b>18,0</b>	<b>36,0</b>	3,75	<b>0,25</b>	<b>20,0</b>	<b>32,0</b>	7,5	<b>1,0</b>	<b>14,5</b>	<b>28,5</b>	
		0,57	10,0	27,0		1,28	16,0	32,0		5,1	14,5	44,5	
		<b>1,70</b>	<b>13,5</b>	<b>36,0</b>		<b>3,82</b>	<b>14,0</b>	<b>36,0</b>		<b>15,3</b>	<b>14,5</b>	<b>28,5</b>	
6	1,7	0,11	14,5	54,0	2,5	0,25	12,0	40,0	5,0	1,0	13,5	27,0	
		0,57	14,5	37,8		1,28	12,0	38,0		5,1	13,5	32,0	
		1,70	9,0	22,5		3,82	12,0	32,0		15,3	9,5	37,0	

*Примечание.* Серым цветом обозначены аномальные случаи, характерные для структурированных обмазок, жирным шрифтом – опыты по визуализации структуры потока.

Таблица 2. Состав и характеристики NaK жидких стекол

Индекс обкладки	Характеристики жидкого стекла		Доза жидкого стекла/воды, мас. %	$P_m$ обкладки, МПа	Название прибора, диаметр цилиндра $D_R$ , мм
	модуль	вязкость, МПа·с			
С2	2,95	500	27,0/0	0,10	Капиллярный вискозиметр ОБ1435, 10, 15, 30 мм
Н2	3,15	80	14,5/4,5	0,75	
С3	2,90	1000	26,5/ 0	0,10	
Н3	3,30	100	24,0/ 0	0,60	Испытательная машина INSTRON, 50, 70 и 90 мм

Для расширения диапазона  $\dot{\gamma}_c$  в большую сторону, использовали нештатные резервуары с диаметром 50, 70 и 90 мм, за счет чего максимально возможное значение секундного расхода обкладки  $Q$  могло достигать  $200 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Чтобы обеспечить испытательные нагрузки, достаточные для экструдирования обкладок из резервуаров столь большого сечения, была использована испытательная машина INSTRON 1251. В этом случае реологические измерения были ограничены заходной зоной, т.е. определением только показателя  $P_0$ .

Тепловая обстановка в зоне течения изучалась с применением хромель-алюмелевой термопары, рабочий спай которой закладывали в кольцевую выточку у выходного торца капилляра  $L = 3d_c$ , плотно прижимая его к корпусу резиновым кольцом. Температуру контролировали в каждом опыте. В случае необходимости температуру пересчитывали на капилляры  $L = 10d_c$ , использованные для измерений реологических показателей, по значениям диссипативной функции  $\tau V$  [6]. Температура холодного спая термопары  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для визуализации профиля течения обкладки в заходной зоне использовали метод окрашивания обкладки фенолфталеином. опыты проводили на вискозиметре ОБ 1435. Заготовку, составленную из чередующихся дисков, заблаговременно спрессованных из окрашенной и неокрашенной обкладки, экструдировали из соответствующего расходного резервуара вискозиметра через плоский диск с отверстием  $d_{C0} = 4 \text{ мм}$  при минимальной и максимальной скорости подачи плунжера  $V_R$ , равной  $0,15$  и  $2,15 \text{ см} \cdot \text{мин}^{-1}$ . Градиент скорости сдвига в отверстии составлял при этом  $40$  и  $610$  ( $D_R = 30 \text{ мм}$ ),  $0,25$  и  $3,80$  ( $D_R = 15 \text{ мм}$ ), а также  $0,10$  и  $1,70 \text{ с}^{-1}$  ( $D_R = 10 \text{ мм}$ ). В табл. 1 результаты замеров  $P_0$  и  $P_L$ , выполненных при этих режимах, выделены жирным шрифтом. В нужный момент шток останавливали. Остаток брикета извлекали из резервуара, разрезали по меридианной плоскости и фотографировали.

Исследовали опытные обкладочные массы, с вещественным составом наполнителя как у покрытия электродов УОНИ 13/55. В составе сухой смеси массовая доля частиц мельче  $0,063 \text{ мм}$  составляла  $30 \%$ , а соотношение фракций близко к тому, которое обеспечивает минимальную долю

междузеренных пустот в уплотненном слое. Для приготовления обкладочных масс использовали NaK жидкое стекло. Его характеристики и условия использования указаны в табл. 2. У образцов С2 и С3, изготовленных на стеклах с вязкостью  $500$  и  $1000 \text{ МПа} \cdot \text{с}$ , вязкостная составляющая потеря напора преобладает над упругой. Обкладки Н2 и Н3 из-за низкой вязкости связующего характеризуются достаточной степенью структурированности, а, следовательно, относительно высокой упругостью. Об этом свидетельствует их большая пластическая прочность  $P_m$ . Обкладки, индексированные как С2 и Н2, исследованы с применением вискозиметра ОБ 1435, а обкладки С3 и Н3 — на испытательной машине INSTRON.

В обкладки с индексом С вводили  $1\%$ , а с индексом Н —  $1,5 \%$  порошкообразной Na-КМЦ марки 85СО. Пластическую прочность обкладки  $P_m$  определяли коническим пластометром. Обкладочные массы готовили в лабораторном интенсивном смесителе.

**Результаты опытов.** О тепловой обстановке в зоне течения можно судить по результатам измерений, приведенных на рис. 1. Они показывают, что обкладка Н2 в состоянии напорного потока, сформированного в ступенчатых каналах с разными сечениями резервуаров, разогревается до меньшей температуры, чем обкладка С2, ввиду ее большей структурированности.

Максимальная температура потока обеих образцов прогрессивно возрастала с увеличением  $\dot{\gamma}$  и достигала ( $55 \dots 65$ ) $^\circ\text{C}$ , соответственно. Она понижалась с уменьшением диаметра резервуара тем в большей мере, чем выше  $\dot{\gamma}_c$ . Как следует из приведенных графиков, зависимости  $\Delta t = f(\dot{\gamma}_c)$  стратифицировались по трем уровням. Выше всех расположились результаты, найденные при  $D_R = 30 \text{ мм}$  (кривая 3), посередине — результаты, найденные при  $D_R = 15 \text{ мм}$  (кривая 2), а ниже всех — при  $D_R = 10 \text{ мм}$  (кривая 1). Температура струи повышается под влиянием увеличения расхода  $Q$  и понижается с увеличением степени редуцирования струи  $\beta = D_R/d_c$ . При  $\beta = \text{const}$  и  $V_R = \text{const}$  температура струи выше, когда использовался резервуар большего сечения и тем значительнее, чем больше  $V_R$ . Это связано с увеличением расхода, во втором случае большем, чем в первом. Такая же

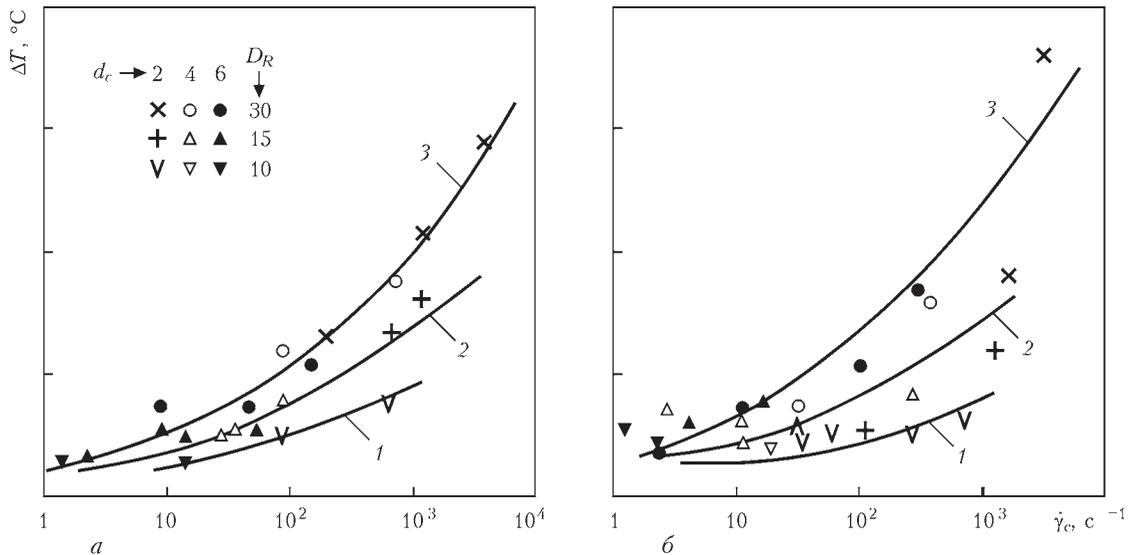


Рис. 1. Изменение температуры струи обмачивающей массы С2 (а) и Н2 (б) в результате их вязкостного разогрева в зависимости от среднего градиента скорости сдвига:  $D_R = 10$  (1), 15 (2) и 30 (3) мм;  $d_c$  — 2, 4 и 6 мм

закономерность наблюдалась и в предыдущих наших исследованиях, в которых температуру струи регистрировали при  $D_R = 30$  мм, изменяли лишь расход и диаметр капилляра [5].

Существенного влияния разогрева струи на вязкость обмачки можно ожидать в опытах с  $D_R = 30$  мм, проведенных при максимальном секундном расходе. Температура струи, вытекающей из сопла при режиме течения ползучести ( $D_R = 10$  мм), не может влиять на вязкость обмачки, даже если используются капилляры с  $L = 10d_c$ .

**Профиль потока.** Результаты визуализации картины напорного течения обмачок С2 и Н2 представлены на рис. 2. Приведенные фотоснимки отражают состояние потока в момент остановки штока. По ним можно судить, что в условиях ламинарного течения поток обмачки осуществляется путем взаимного телескопического перемещения слоев, которое усложнено большими, неравномерными и немонотонными деформациями. Судя по форме линий тока в заходной зоне, структуры потоков сравниваемых обмачок, существенно различающихся степенью структурированности, по-разному реагируют на изменение скорости истечения и диаметра резервуара.

Рассмотрим сначала поток обмачки С2 с вязким жидким стеклом в цилиндре с  $D_R = 10$  мм при минимальном расходе ( $\dot{\gamma}_c = 4,5 \text{ c}^{-1}$ ). Здесь осуществляется медленное (ползущее) течение. Задолго до подхода к выпускному отверстию центральные продольные слои заготовки, меньше всего ощущающие тормозящее действие цилиндрической стенки резервуара, существенно ускоряются и, перемещаясь по сдвиговому механизму, образуют совместно с другими слоями, как и в бесконечной трубе, профиль потока, близкий по профилю к параболическому. В ядре профиль

почти плоский с такой же толщиной, как у изначального слоя. На границе со стенкой резервуара толщина слоя минимальна. С увеличением расхода до максимального ( $60 \text{ c}^{-1}$ ) появляются признаки скольжения обмачки по стенке резервуара, поэтому начальная толщина слоя на стенке при этой скорости сохраняется дольше.

В резервуаре с диаметром 15 мм ( $\dot{\gamma}_c = 10 \text{ c}^{-1}$ ) на течение обмачки начинает влиять ее диссипативный разогрев, и его картина усложняется. На подходе к выпускному отверстию толщина слоев уменьшается. Этому должно способствовать и «обжимающее»

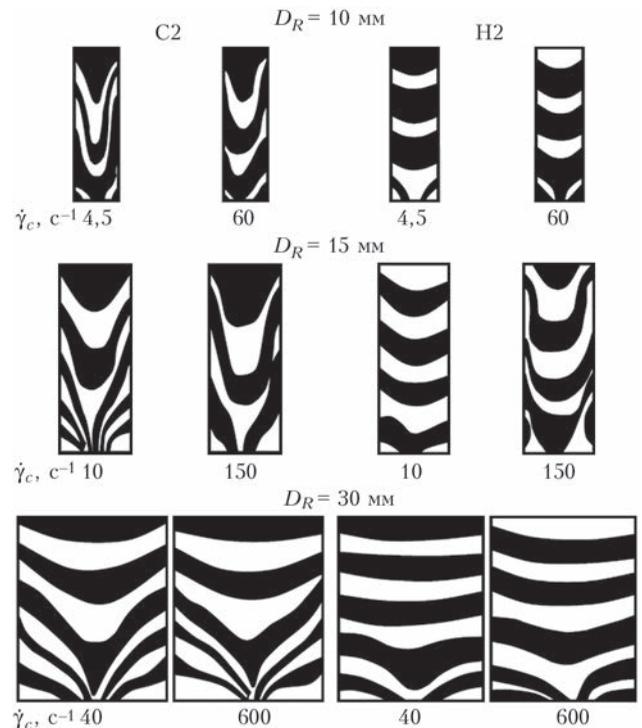


Рис. 2. Профиль потока обмачки С2 и Н2 в резервуаре капиллярного вискозиметра с диаметром  $D_R = 10, 15$  и 30 мм через отверстие  $d_{c0} = 4$  мм

действие застойных зон, возникающих в телесном углу, образованном цилиндрической и торцевой стенками резервуара. Рупорообразная форма потока на подходе к выпускному отверстию подтверждает это. В опыте с  $\dot{\gamma}_c = 150 \text{ с}^{-1}$  зафиксирован когезионный срыв потока, который можно считать результатом разрядки упругой энергии, накопившейся в обмазке в предшествующий период деформирования. Признаки обжимающего действия упругих напряжений здесь проявились ярче, чем в других опытах. Очень узкий конвергентный угол на входе в отверстие наверняка возникает под их влиянием. Подобную картину течения наблюдали в напорном потоке пластилина, которым моделировали картину течения металлической заготовки в работе [7]. Зона деформации все еще сохраняет достаточно большую протяженность.

При диаметре цилиндра 30 мм поток независимо от расхода приобретает рупорообразную форму почти сразу после того, как начинается его движение, а пространство, в котором происходит деформация, по-прежнему занимает весьма большой объем.

Обмазка Н2 в узких цилиндрах демонстрирует пробковый профиль потока. По сравнению с обмазкой С2 ее деформация сосредоточена в зоне небольшой протяженности, непосредственно примыкающей к выходному соплу. Видимо под влиянием накапливаемых упругих напряжений, величину которых у этого вида обмазки следует ожидать большей, чем у обмазки С2, при диаметре цилиндра 15 мм и  $\dot{\gamma}_c = 150 \text{ с}^{-1}$  появляются признаки ее прилипания к боковой стенке цилиндра (одновременно существенно возрастает деформируемый объем массы). В этом случае зарегистрирован явный срыв струи, возникший в результате разрядки упругих напряжений, который, по всей видимости, сопровождается ее разогревом. В прорыве к выпускному отверстию поток преодолел обжимающее действие застойной зоны. На фото виден ее кольцевой остаток, примыкающий к торцевой поверхности цилиндра.

В цилиндре с диаметром 30 мм зона деформации со слабо выраженным рупорообразным профилем течения, непосредственно примыкающая к выходному отверстию, вновь уменьшилась в объеме.

На всех фотографиях наряду с описанными выше свидетельствами неоднородности просматриваются также признаки немонотонности потока. Последние, по нашему мнению, проявляются прежде всего как отклонения профиля деформируемых слоев от осесимметричной формы. Важно отметить, что формирование профиля потока у вязкой обмазки начинается задолго до устья капилляра, в который она входит уже со сформиро-

вавшимся профилем. У низковязкой обмазки этот процесс на подходе к капилляру только начинается. Завершается он, по-видимому, на начальном участке капилляра. Именно здесь зарождается пульсация струи обмазочных масс [2] и полимерных расплавов [8].

Необычна также реакция потока низковязкой обмазки на удлинение капилляра, о чем говорится ниже.

**Кривые экструзии.** Как и в опытах, проведенных с использованием капиллярного вискозиметра с рабочим цилиндром  $D_R = 30 \text{ мм}$ , результаты которых опубликованы в работах [2–4], выявлено, что характер экструзионных кривых зависит от консистенции обмазочных масс и режимов их напорного течения. У обмазок С2 с вязкой жидкостекольной связкой все они, независимо от сечения цилиндра, имеют сглаженный вид, на который мало влияет скорость потока. Имеется в виду темп нарастания давления в начальной стадии деформирования, всплеск его в момент начала течения и темп последующего понижения вплоть до выхода на стационарную стадию. Повышение скорости деформирования сглаживает стартовые пики, так как накопление в потоке упругих напряжений существенно ускоряется [2]. В опытах с рабочим цилиндром  $D_R = 15 \text{ мм}$  и  $d_c = 4 \text{ мм}$  наблюдались очень интересные по форме кривые, характеризующиеся медленным набором давления и понижением его после достижения пикового значения (рис. 3). Такая форма свидетельствует о малых и примерно равных скоростях накопления и релаксации упругих напряжений, что характерно для завершения стадии ползущего течения. Именно в этом опыте визуализацией выявлены профили, характерные для срыва потока. На экструзионных кривых они проявляются в виде падения нисходящей ветви эволюции давления ниже уровня, зарегистрированного в предыдущем, менее скоростном режиме течения. Как следует из данных, приведенных в табл. 1, такого рода срыв у вязкой обмазки С2 зафиксирован в этом опыте только на кривой  $P_0 = f(t)$ . Это подтверждено и ее формой на рис. 3. На кривой  $P_L = f(t)$  упругий сброс давления не наблюдался. Можно заключить, что внутренняя поверхность капилляра способна, если нет пристеночного проскальзывания, сдержать до определенного момента релаксацию упругих напряжений.

У обмазочной массы Н2, изготовленной на низковязком жидком стекле, темп нарастания, а также понижения пикового давления, как правило, существенно выше. Особенно, когда это касается кривых  $P_L = f(t)$ . Судя по количеству затененных ячеек в табл. 1, таких аномальных случаев, характерных для структурированных обмазок [2–4], на-

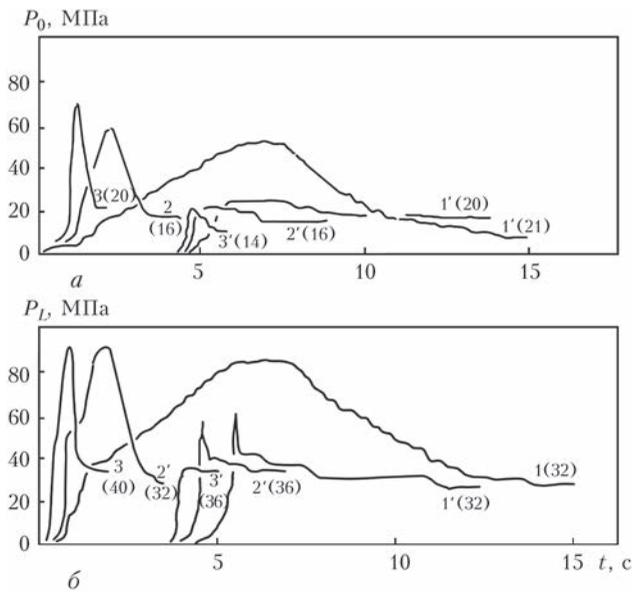


Рис. 3. Вид экструзионных кривых, зарегистрированных при испытании образочных масс С2 (1, 2, 3) и Н2 (1\*, 2\* и 3\*) при градиенте скорости сдвига соответственно 10, 50 и 150 с<sup>-1</sup>: а — кривые  $P_0 = f(t)$ ; б —  $P_L = f(t)$  ( $D_R = 15$  мм;  $d_c = 4$  мм; в скобках — значение давления)

много больше, чем у ее вязкого аналога в таких же условиях течения. В двух опытах из шести оно имело место для  $P_0 = f(t)$  и  $P_L = f(t)$ , в трех — только для  $P_0 = f(t)$  и в двух — только для  $P_L = f(t)$ . Можно сделать вывод, что поверхность капилляра способна не только задержать, но в определенных условиях спровоцировать мгновенную релаксацию упругих напряжений. Например, под влиянием диссипативного разогрева, а также вследствие пристеночного скольжения струи по адгезионному или, реже, по когезионному механизму [8].

Такие сбросы давления являются одним из свидетельств нарушения стабильности потока под влиянием релаксации упругих напряжений.

**Кривые течения.** Кривые течения  $P_0 = f(\dot{\gamma}_c)$  и  $\tau = f(\dot{\gamma}_c)$  — это графически оформленные результаты совместного анализа визуализированных картинок и синхронно зарегистрированных режимных показателей напорного течения образочных масс. У потоков сопоставляемых образков сквозь ступенчатые каналы они, как и у других вязкоупругих материалов, в логарифмической гомологии имеют вид прямых, в большей или меньшей мере наклоненных к оси градиентов скорости. Кривые течения образки С2 характеризуются большим углом наклона, чем у образки Н2, поскольку первая по свойствам ближе к ньютоновской жидкости, чем вторая.

В таком систематизированном и удобном для рассмотрения виде они, по нашему мнению, документально подтверждают следующие важные положения.

Структура и реологические показатели напорного течения образочных масс в ступенчатом ка-

нале формируются под влиянием возмущающего действия торцевой стенки резервуара, резкого редуцирования струи при входе в капилляр, адгезионного торможения потока стенками резервуара и капилляра, его вязкостного разогрева в зоне максимальной сдвиговой деформации, накопления и релаксации упругих напряжений. Некоторые из названных факторов влияют на показатели образков антибатно друг другу. Потоки образки реагируют на перечисленные виды возмущений путем изменения баланса энергетических затрат на течение и в резервуаре, и в капилляре. К примеру, если вязкость образков С2 и Н2 превалирует над упругостью, а это имеет место при  $D_R = 30$  мм, их кривые течения  $P_0 = f(\dot{\gamma}_c)$  являются инвариантными, т.е. независимыми от объемного расхода и сечения капилляра. В опытах с меньшими цилиндрами фигуративные точки опускаются в результате релаксации упругих напряжений на более благоприятные энергетические уровни течения.

Результаты, полученные в опытах с резервуарами меньшего сечения, расслоились за счет индивидуальных или групповых смещений фигуративных точек вниз, отображающих понижение сопротивления потоку. Исходная инвариантная кривая течения расслаивается при этом на две или на три прямые (по числу использованных капилляров).

Так, при  $D_R = 15$  мм с инвариантной кривой  $P_0 = f(\dot{\gamma}_c)$  переместился один результат, полученный при  $d_c = 2$  мм; при  $D_R = 10$  мм результаты расслоились по трем уровням, оказавшись на взаимно параллельных прямых. Точки, которые отражают результаты, полученные при  $d_c = 2$  мм, переместились на самую низкую кривую. Два результата, полученные при  $d_c = 4$  мм, оказались на средней кривой (третий получен при  $d_c = 6$  мм); два результата, полученные при  $d_c = 6$  мм, оказались на верхней кривой (третий получен при  $d_c = 4$  мм).

Как уже отмечалось выше, расслоение кривых течения  $P_0 = f(\dot{\gamma}_c)$  вызвано релаксационными сбросами давления и вязкостным разогревом струи, которые зарегистрированы на нисходящих ветвях соответствующих экструзионных кривых. Параллельное смещение логарифмических монологов кривых течения свидетельствует о неизменности структуры потока.

У низковязкой образки Н2 начальная кривая течения  $P_0 = f(\dot{\gamma}_c)$  тоже расслоилась, но уже не только по высоте, но и по наклону к оси градиентов скорости сдвига, особенно при  $D_R = 15$  мм, что свидетельствует об изменении не только энергетического состояния системы, но и структуры потока.

Еще более сложный ход кривых течения  $\tau = f(\dot{\gamma}_c)$  у образков С2 и Н2. Это связано с большим

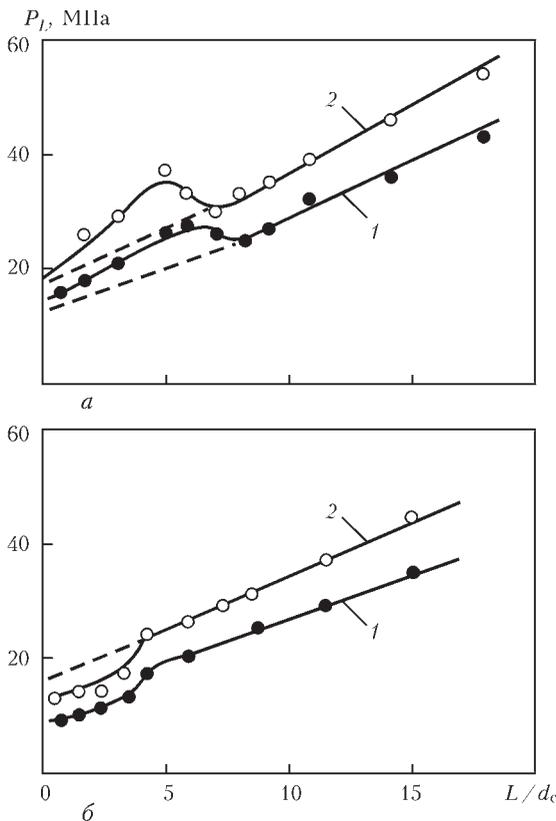


Рис. 4. Зависимость общего перепада давления от соотношения  $L/d_c$  каналов при расходах низковязкой обмазки  $1 \text{ cm}^3 \cdot \text{c}^{-1}$  (1) и  $15,3 \text{ cm}^3 \cdot \text{c}^{-1}$  (2) (а —  $d_c = 2 \text{ мм}$ ; б — 6)

числом возмущающих факторов, действие которых зависит не только от режимных параметров, но и от структуры сравниваемых обмазок. К примеру, у более структурированной обмазки Н2 в меньшей мере проявляется диссипативный разогрев, но интенсивнее развиваются эффекты пристеночного проскальзывания. Можно полагать, что стадия гидродинамической, температурной и релаксационной стационарности потока, не завершившаяся в предкапиллярной зоне измерительной ячейки, перемещается на начальный участок капиллярного канала.

Как следует из рис. 4, общий перепад давления при постепенном увеличении приведенной длины капилляра для низковязкой обмазки возрастает немонотонно. При достижении определенного значения  $L/d_c$  происходит разрядка накопившихся упругих напряжений, и только после этого начинается прямолинейная ветвь кривой  $P_L = f(L/d_c)$ . Чем меньше диаметр капилляра и выше секундный расход обмазки, тем больший сброс давления после достижения максимума. На капиллярах большого диаметра такой аномалии нет. При пропуске высоковязкой обмазки даже сквозь капилляры с малым сечением канала переход на пропорциональный участок кривой  $P_L = f(L/d_c)$  тоже происходит без всплеска давления, как на нижнем графике рис. 4 [4].

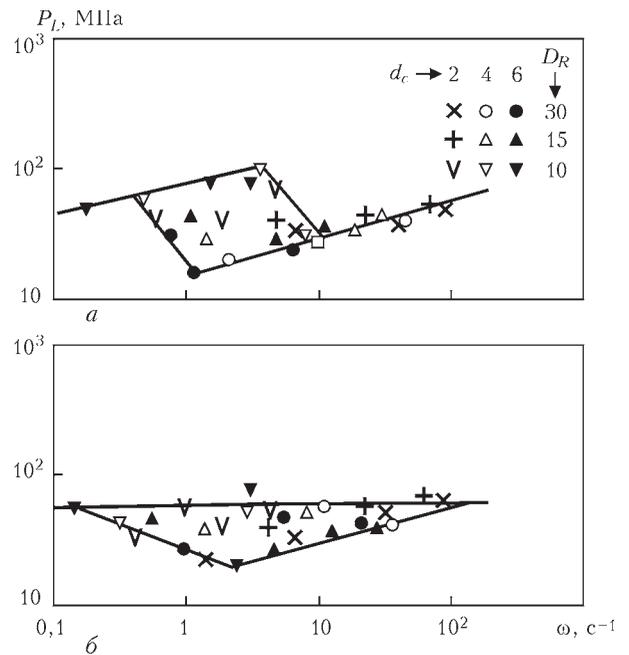


Рис. 5. Зависимость суммарных потерь напора в заходной зоне и в капилляре  $P_L$  от показателя  $\omega$ : а — C2; б — H2

Хотя неинвариантный ход кривых течения отражает наличие в очаге деформации нестационарных явлений, это не исключило возможности использования экспериментальных результатов для вычисления реологических показателей электродных обмазочных масс. Полученные результаты использованы при анализе возможных причин возникновения указанных явлений.

**Об общих потерях давления.** В общих потерях давления  $P_L = P_0 + P_c$  его составляющие  $P_0$  и  $P_c$  не только суммируются, но и в значительной мере влияют на значение  $P_L$  из-за взаимного влияния друг на друга. Взаимное влияние аргументов сложной функции обычно учитывается как их произведение, т. е.  $\dot{\gamma}_R \dot{\gamma}_c$ . Исходя из соображений размерности, используют их среднее геометрическое значение (в нашем случае  $\omega = \sqrt{\dot{\gamma}_R \dot{\gamma}_c}$ ).

Если  $\dot{\gamma}_R = 2V_R/D_R$ ,  $\dot{\gamma}_c = 2V_R/d_c(D_R/d_c)^2$  то их произведение можно представить в виде:  $2V_R/D_R d_c (D_R/d_c)^2 = 4\beta^2 V_R^2 / D_R d_c$ . В логарифмической модификации выражение среднего геометрического имеет вид:  $\lg \omega = \lg \sqrt{4\beta^2 V_R^2 / D_R d_c}$ .

Видно, что потери давления на организацию напорного потока обмазочной массы являются сложной функцией скорости плунжера, нагнетающего обмазку в зону течения, диаметров цилиндра и капилляра, а также их соотношения, определяющего степень редуцирования струи капилляром. При неизотермических условиях дополнительно включается еще и влияние вязкостного нагрева массы, который концентрируется в зоне наибольшего градиента скорости сдвига.

Расчеты показали, что в наших опытах доля  $\dot{\gamma}_R$  в произведении и  $\dot{\gamma}_R \dot{\gamma}_c$  изменялась в пределах от 0,03 до 21,5%.

Когда  $D_R \geq 30$  мм, градиент скорости сдвига в цилиндре значительно меньше, чем в капилляре, и его влиянием на  $P_L$  можно пренебречь. При  $D_R \leq 10$  мм влияние градиента скорости сдвига становится достаточно заметным и его следует учитывать.

На рис. 5 показана зависимость  $P_L$  от  $\omega$  в напорном потоке обмазок С2 и Н2. На рис. 5, а (обмазка С2) можно выделить 3 участка. Левый и правый прямолинейные участки относятся, соответственно, к медленному (ползущему) и быстрому стационарному течению. Они инвариантны относительно комплексного показателя режима деформирования. Между ними расположена зона неустойчивости, внешним видом напоминающая режим «stick-slip»-потока. С таким видом неустойчивости часто встречаются в технологии переработки полимерных материалов и представляют в виде графиков  $\tau = f(\dot{\gamma}_c)$  или  $\dot{\gamma}_c = f(\tau)$  [9], а в одной из первых посвященных ему публикаций [10] — в виде  $s = f(\tau)$ , где  $s$  — упругая, т.е. восстанавливаемая деформация.

Считается, что неустойчивость потока, зарегистрированная в виде перехода режима течения с верхнего на нижний, менее энергоемкий режим течения, связана с конкуренцией упругих и вязких сил.

На рис. 5, б (обмазка Н2) аналогичная по смыслу реограмма имеет вид очень узкого треугольника, отражающего заметный разброс результатов только в случае использования малых расходных цилиндров. При увеличении  $D_R$  до 15 мм рассеяние уменьшается, а когда  $D_R = 30$  мм рассеяния нет.

Аналогичный, но не столь ярко выраженный вид имеют зависимости  $P_0$  от  $\omega$ .

На рис. 6 результаты, полученные при исследовании обмазки С2, отображены в виде зависимости  $Q = f(P_L)$ , характеризующей процесс изготовления электродов на электрообмазочных прессах с гидравлическим приводом, без пересчета  $Q$  и  $P$  на консистентные переменные  $\tau$  и  $\dot{\gamma}_c$ . Видно, что в такой интерпретации они весьма похожи на напорно-расходную характеристику, описанную в работе [1].

Ее можно объяснить следующим образом. При низких давлениях (при  $Q < 1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ) обмазка находится в состоянии ползучего течения, в котором скорость разрушения ее коагуляционной структуры близка по значению к скорости релаксации упругих напряжений. Роль саморазогрева обмазок на этой стадии течения незначительна. По мере повышения  $P_L$  скорость течения увеличивается, все большая часть упругих напряжений, не успевающая релаксировать, накапливается в струе. При достижении  $Q \approx 1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  количество накопившейся упругой энергии достаточно для срыва потока, в результате которого структура обмазки разрушается, вязкость ее резко понижается, значение  $P_L$  уменьшается, а дальнейшее ускорение струи осуществляется при меньших нарастаниях давления. Несомненно, важную роль в облегчении срыва струи под влиянием упругих напряжений и после него играет температура струи. Она, как и скорость, способствует разрушению структуры и понижению вязкости обмазки в потоке. Показатели упругости при этом изменяются мало. В значительно большей степени понижается вязкость, а вместе с ней способность обмазки сглаживать неблагоприятное влияние упругости обмазки на стабильность напорного потока.

Представленные на рис. 5 результаты получены при использовании вискозиметра постоянных расходов со ступенчатым регулированием расхода и дискретным увеличением скорости потока путем изменения сечения струи. Как следствие, температурные и скоростные условия течения от опыта к опыту изменялись ступенчатым образом, в результате чего напорно-расходные кривые тоже приобретали прерывистый вид.

**Влияние способа регулирования режима на кривые течения.** Поток обмазки в предкапиллярной зоне деформируется сдвигом и растяжением. Деформацию сдвига в резервуаре перед капилляром  $\dot{\gamma}_R$  можно представить выражением  $\dot{\gamma}_R = \dot{\gamma}_c / \beta^3$ , где  $\dot{\gamma}_c$  — градиент скорости сдвига в капилляре, а  $\beta$  — степень редуцирования струи,  $\beta = D_R/d_c$ . Достигнутое в ходе редуцирования

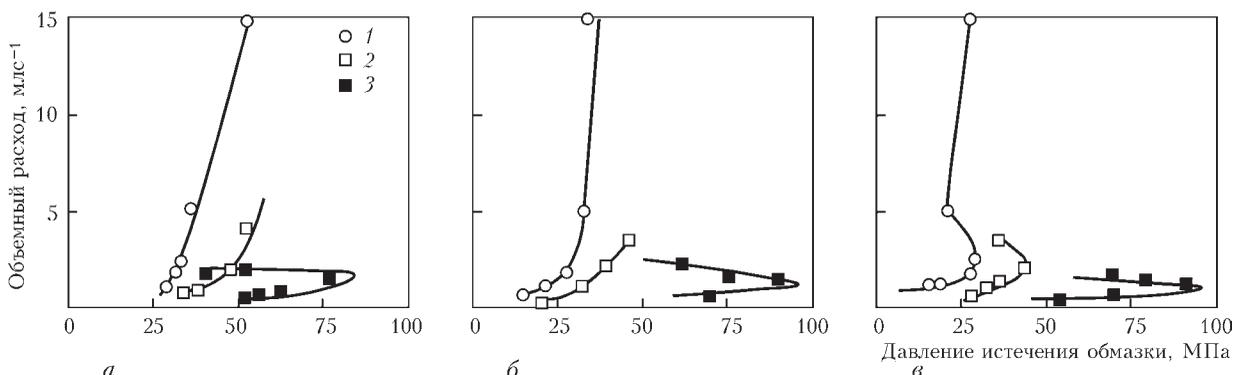


Рис. 6. Давление истечения обмазки из цилиндра через капилляр с диаметром канала 2 (а), 4 (б), 6 (в) мм и длиной  $L = 10d_c$ .  $D_R = 30$  мм (1), 15 (2) и 10 (3)

растяжение потока обмазки, именуемое деформацией по Генки, представляют как [11]:

$$\varepsilon \equiv \int_0^{+\infty} \dot{\varepsilon} dt = \int_{v_z(-\infty)}^{v_x(+\infty)} \frac{dz}{v_z} = \ln(\beta^2),$$

где  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформации растяжением.

В свою очередь  $\dot{\gamma}_c$  связано с числом Дебори (или, что то же самое, критерием эластической турбулентности  $Re_e$ ) выражением  $De = \theta \dot{\gamma}_c$ .

Видим, что градиент скорости сдвига в капилляре и общая степень вытяжки потока являются функциями одного и того же аргумента  $\beta$ . Тем не менее, они по-разному реагируют на его изменения. При одной и той же величине  $\beta$  увеличение  $\dot{\gamma}_R$  должно способствовать большему сдвиговому разрушению структуры обмазки в капилляре, в то время как с повышением  $\beta$  при  $De = const$  следует ожидать большего растяжения потока.

Это следует из результатов работы [11], в которой изучено влияние  $\beta$  и  $De$  на структуру напорного потока так называемой жидкости Богера. Ее состав как смесь трех полимерных растворов отличается специфическими реологическими свойствами, а именно, ее показатель упругости  $\xi$  существенно понижается с увеличением скорости сдвиговой деформации, в то время как сдвиговая вязкость  $\eta$  остается почти без изменений. Возможно именно по этой причине, исследуя жидкость Богера в области сравнительно небольших изменений  $\beta$  и  $De$ , удалось обнаружить практически полный набор нестабильностей, с которыми встречаются при промышленной переработке полимеров, а именно: циклическое, квазипериодическое и вихреобразное течение с образованием входного, пульсирующего или вращающегося вихря.

Опыты проведены с применением пневматического капиллярного вискозиметра. Чтобы избежать нежелательных вибрационных воздействий вискозиметра на результаты исследования, контролируемая жидкость подавалась из расходного танка в измерительную ячейку вискозиметра через регулирующие клапаны исключительно под влиянием статического давления. Рециркуляционный насос в ходе измерений не работал. Чтобы поддерживать нужное соотношение сечений капилляра и резервуара, т.е.  $\beta$ , в штатный резервуар вставляли соответствующие вкладыши. Область использованных режимов течения ограничена значениями числа  $De$  в пределах от 2 до 5, а показателя  $\beta$  — в пределах от 2 до 6. Для измерения скорости струи использовали лазерный скоростемер Доплера. Профиль потока регистрировался на видеоленту скоростной телекамерой высокого разрешения. Результаты опытов представлены на рис. 7. На нем обозначены зоны выявленных в ходе опытов нестабильностей.

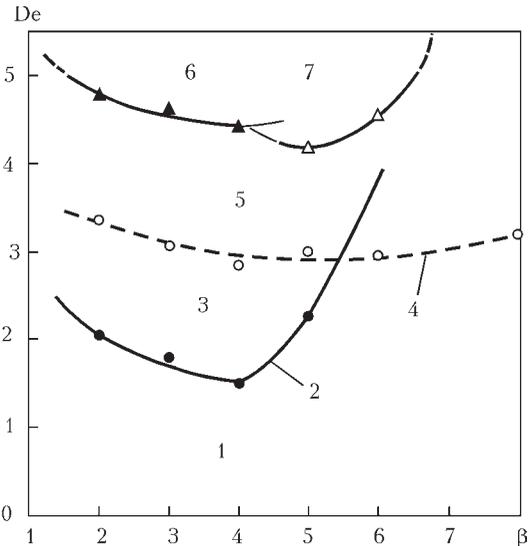


Рис. 7. Виды нестабильностей течения в осесимметричном внезапно суживающемся канале в зависимости от соотношения степени контрагирования потока и критерия эластической турбулентности: 1 — устойчивое течение; 2, 4 — соответственно границы устойчивого и воронкообразного течения; 3, 5, 6 — соответственно циклическое, квазипериодическое; пульсирующее; 7 — вращающаяся воронка [11]

Как следует из приведенного графика, стабильное течение в предкапиллярном пространстве резервуара достигается в зоне 1 при относительно низких значениях числа  $De$  и независимо от того, какой величины деформация по Генки используется для создания потока.

Граница зоны стабильности ограничена кривой 2. Форма ее свидетельствует о том, что при  $\beta < 4$  нестабильность потока наступает уже при весьма ограниченных повышениях числа  $De$ . Напротив, если  $\beta > 4$ , можно использовать режимы течения, характеризующиеся все более высокими значениями числа  $De$  и тем большими, чем больше  $\beta$ .

В наших опытах диапазон изменения значений  $\beta$  на порядок, а числа  $De$  на два порядка больше, чем в работе [11]. Тем не менее, как следует из рис. 5, размеры зоны нестабильности тоже весьма ограничены, особенно для обмазки С2.

Предположим, что закономерности, выявленные при исследовании жидкости Богера как модели вязкоупругого материала, можно перенести на электродные обмазки. Тогда, судя по графику на рис. 7, единственный способ обойти зону нестабильности при экструдировании электродных обмазочных масс, это использовать режим формирования потока с высокими значениями степени обжатия струи, т.е. работать с резервуарами достаточно большого диаметра.

При очень больших значениях  $\beta$ , обеспечивающих достаточное удаление от правой, круто уходящей вверх ветви границы 2, видимо, можно будет повышать скорость деформации обмазки методом все более быстрого нагнетания ее плун-

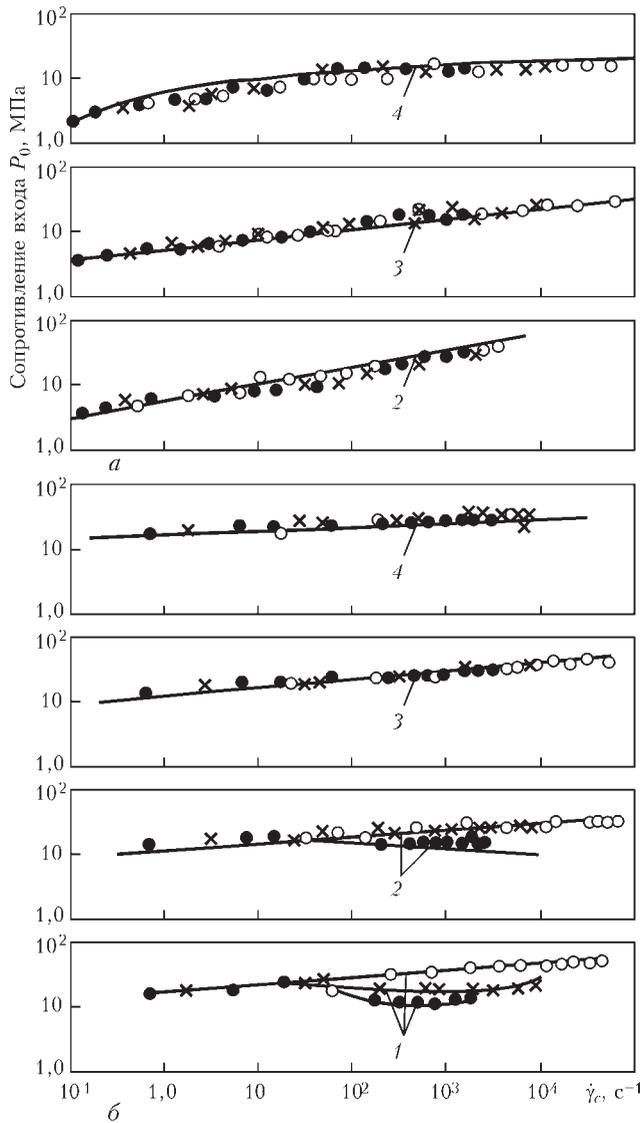


Рис. 8. Напорно-расходные характеристики обмачочных масс С3 (а) и НЗ (б), полученных с применением расходных цилиндров с диаметрами: для а —  $D_R = 50$  (1); 70 (2); 90 мм (3); для б —  $D_R = 30$  (1); 50 (2); 70 (3); 90 мм (4)

жером в зону течения, не опасаясь пересечь указанную границу. Для обмачки С2 это удаление будет меньшим, чем для обмачки Н2, у которой эта зона имеет значительно большую протяженность.

Для проверки справедливости этого предположения были проведены опыты с обмачками С3 и НЗ, экструдирруемыми через отверстия в запорном диске диаметром 2, 4 и 6 мм из резервуаров с диаметром от 30 до 90 мм.

Чтобы надежно исключить влияние трения столба массы в цилиндре на потери напора, применили так называемое обратное прессование, которое используется в тех же целях в технологии прессования металлов [7]. В этом случае необходимую серию измерений осуществляли, экструдировав одну заготовку на режимах с постепенно увеличивающимися от опыта к опыту расходами. Общий диапазон изменения градиента скорости

Таблица 3. Характеристики экструдирования обмачки

$D_R$ , мм	$d_0$ , мм	Усилие прессования, т	$P_0$ , МПа
50	2	47,8	0,330
	4	45,1	0,230
	6	34,3	0,180
70	2	98,2	0,255
	4	84,7	0,220
	6	69,3	0,180
90	2	101,7	0,160
	4	98,6	0,155
	6	95,4	0,155

сдвига — от 0,1 до  $10^5$   $s^{-1}$ . Результаты приведены на рис. 8.

Видно, что для высоковязкой обмачки С3 результаты инвариантны во всем диапазоне измерений  $\dot{\gamma}_c$ . Следовательно, при  $D_R \geq 30$  мм ее напорные потоки не склонны к нестабильности в очень широком диапазоне ( $\dot{\gamma}_c$ ).

Низковязкая обмачка НЗ проявляет склонность к нестабильности потока, вызванную нерелаксированными упругими напряжениями. Неинвариантность ее кривых течения  $P_0 = f(\dot{\gamma}_c)$  имеет место, пока  $D_R$  не достигнет 70 мм. Чем больше  $D_R$ , тем меньше участок неинвариантности кривой течения. При  $D_R = 70$  мм неинвариантность исчезает.

Чем больше  $D_R$ , тем меньше индекс течения  $n_0$ , что свидетельствует о нарастании степени неньютоновского поведения обмачок, а, следовательно, о возрастании текучести обмачки, вследствие большего разрушения структуры и меньшего, вследствие этого, накопления упругой энергии в потоке. Чем больше сечение цилиндров, тем при меньшей скорости течения кривая выходит на участок насыщения. У обмачки С3 кривые, в конце концов, полностью выположились.

По имеющимся у нас данным с увеличением степени обжатия влияние исходной вязкости экструдированного материала на температуру струи постепенно уменьшается и при достаточно высоких значениях  $\beta$  становится незначительным.

По результатам исследования обмачки С3 рассчитали значения усилия и давлений экструдирования  $P_0$  при достижении участка насыщения кривой течения. Результаты расчетов приведены в табл. 3. Они показывают, что при увеличении площади сечения цилиндра в 3,2 раза усилие прессования увеличилось лишь в 2,2...2,8 раза. Давление прессования в наибольшей мере понизилось при максимальном показателе сжатия струи: при  $d_{C0} = 2$  мм — в 1,2...2,1 раза. Чем больше  $d_{C0}$ , тем в меньшей мере ощущается влияние показателя  $\beta$  на  $P_{C0}$ .

**Показатели вязкоупругости сравниваемых обмачочных масс.** На рис. 9 приведена зависи-

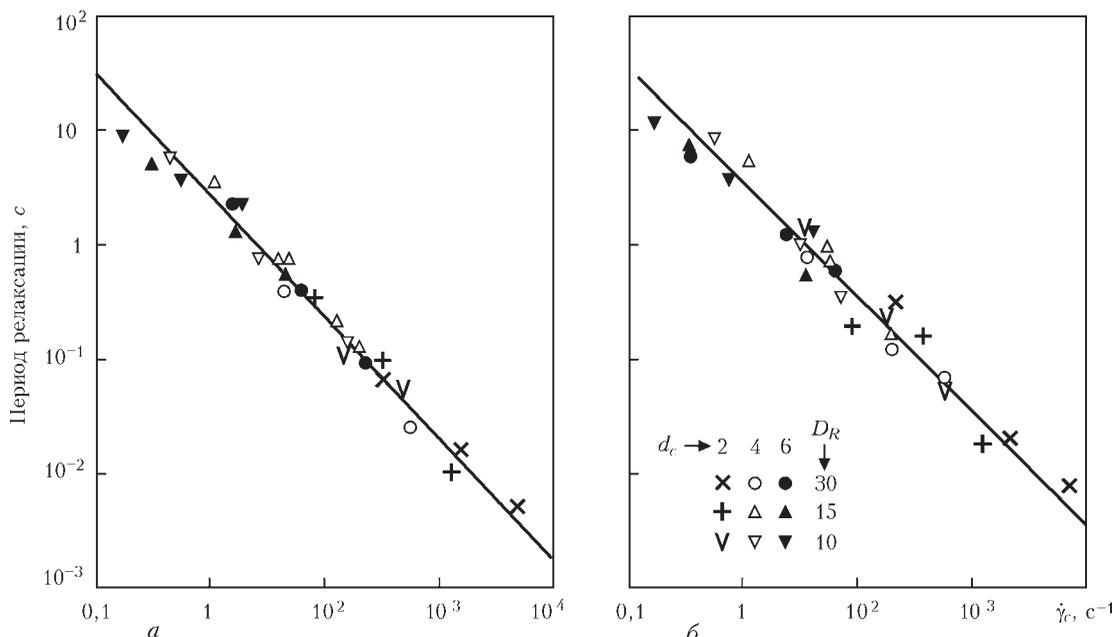


Рис. 9. Зависимость периода релаксации обзаочных масс С2 (а) и Н2 (б), экструдированных из резервуаров с  $D_R = 10, 15$  и  $30$  мм через капилляры с  $d_c = 2, 4$  и  $6$  мм, от градиента скорости сдвига

мость периода релаксации обзаочек С2 и Н2 от градиента скорости сдвига, а на рис. 10 — влияние градиента скорости сдвига на сдвиговую вязкость и коэффициент нормальных напряжений, а также средней скорости деформации растяжения — на продольную вязкость обзаочек С2 и Н2.

Из рис. 9 следует, что по влиянию скорости деформации на характеристическое время (период релаксации  $\theta$ ), сравниваемые обзаочки мало отличаю-

ся друг от друга. Значения  $\dot{\gamma}_c$ , при которых функции  $\theta(\dot{\gamma}_c)$  пересекают горизонталь  $\theta = 1$ , для сравниваемых обзаочек примерно одинаковы ( $\dot{\gamma}_c \approx 40 \dots 60$   $\text{с}^{-1}$ ). Однако рассеяние найденных в экспериментах значений  $\theta$  у обзаочки Н2 больше, чем у обзаочки С2. Так, у обзаочки С2 соотношение  $\theta = \eta/G$  было близким к 1 только в двух опытах ( $\beta = 2,5$ ,  $\dot{\gamma}_c = 50$   $\text{с}^{-1}$ ) и ( $\beta = 2,5$ ,  $\dot{\gamma}_c = 35$   $\text{с}^{-1}$ ). При испытании низковязкой обзаочки оказалось 5 таких слу-

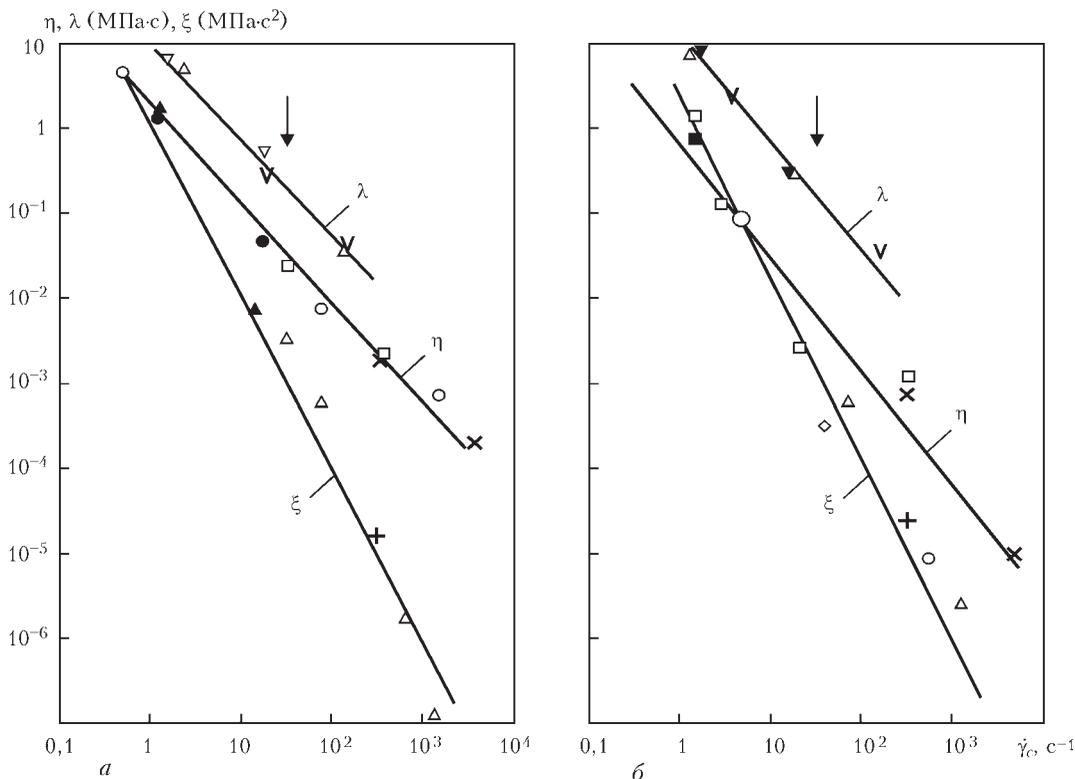


Рис. 10. Зависимость  $\eta$ ,  $\xi$  и  $\lambda$  от скорости сдвигового и продольного течения: а — С2; б — Н2 (стрелками указано значение  $\dot{\gamma}_c$ , при котором выполняется условие  $\theta = 1$ )

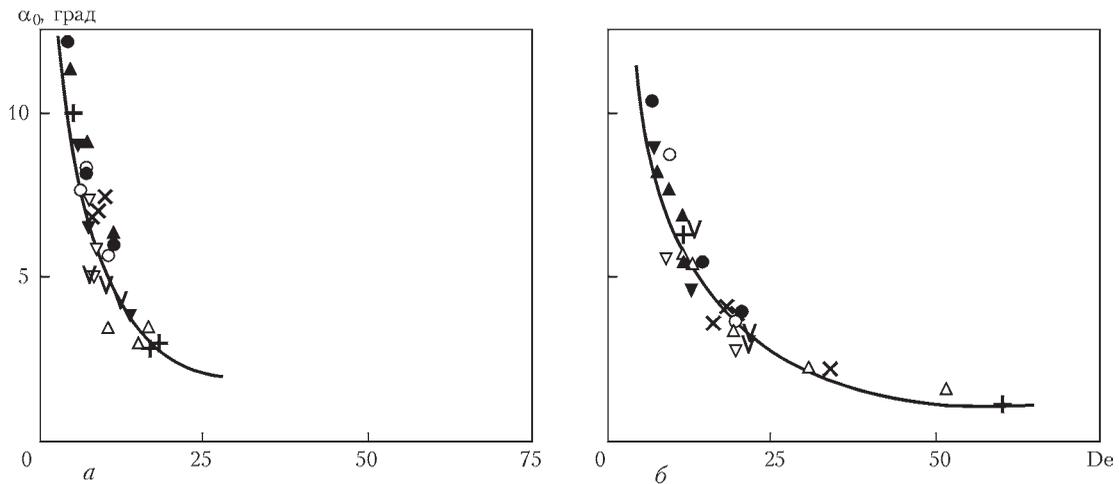


Рис. 11. Влияние значения числа De на угол естественной конвергенции обмачочных масс С2 (а) и Н2 (б), экструдированных из резервуаров с  $D_R = 10, 15$  и  $30$  мм через капилляры с  $d_c = 2, 4$  и  $6$  мм

чаев:  $(\beta = 7,5, \dot{\gamma}_c = 40 \text{ с}^{-1})$ ,  $(\beta = 3,75, \dot{\gamma}_c = 40 \text{ с}^{-1})$ ,  $(\beta = 7,5, \dot{\gamma}_c = 40 \text{ с}^{-1})$ ,  $(\beta = 5, \dot{\gamma}_c = 50 \text{ с}^{-1})$  и  $(\beta = 2,5, \dot{\gamma}_c = 22 \text{ с}^{-1})$ .

В работах [2, 3] было показано, что  $\theta = \eta/G = 1$  является необходимым, но не всегда достаточным условием возникновения продолжительных пульсирующих режимов течения обмазок через капилляр. Возникнут ли они в системе из резервуара и капилляра на самом деле и будут ли после этого продолжительными, определится соотношением  $\eta/\xi$ , которое достигается в момент  $\theta = 1$ . Как следует из рис. 10, вследствие разрушения структуры обмазок функции  $\eta(\dot{\gamma}_c)$  и  $\xi(\dot{\gamma}_c)$  убывают по мере увеличения  $\dot{\gamma}_c$ , вторая круче, чем первая, поэтому они пересекаются друг с другом. Левее точки пересечения  $\xi > \eta$ , поэтому вязкость обмазки не способна демпфировать влияние упругих напряжений. Такое соотношение будет выполняться

вплоть до нулевых скоростей течения, поскольку  $\xi_0 = (\eta_0)\theta$  [12]. Правее точки пересечения  $\xi < \eta$ , поэтому такая способность у обмазки имеется и тем большая, чем выше  $\dot{\gamma}_c$ .

Из рис. 10 также следует, что взаимное положение прямых  $\eta(\dot{\gamma}_c)$  и  $\xi(\dot{\gamma}_c)$  неодинаково из-за меньшей вязкости обмазки Н2. Поэтому точка пересечения конкурирующих функций у обмазки С2 лежит значительно левее критического значения  $\dot{\gamma}_c$  (обозначено вертикальной стрелкой), при котором выполняется условие  $\theta = 1$ . Как следствие, имеется достаточный запас превышения  $\eta(\dot{\gamma}_c)$  над  $\xi(\dot{\gamma}_c)$ , чтобы противодействовать зарождению пульсирующего режима напорного потока.

У обмазки Н2 точка пересечения сравниваемых функций  $\eta(\dot{\gamma}_c)$  и  $\xi(\dot{\gamma}_c)$  тоже лежит левее критического значения  $\dot{\gamma}_c$ , но значительно ближе к нему. В результате превышение демпфирующей

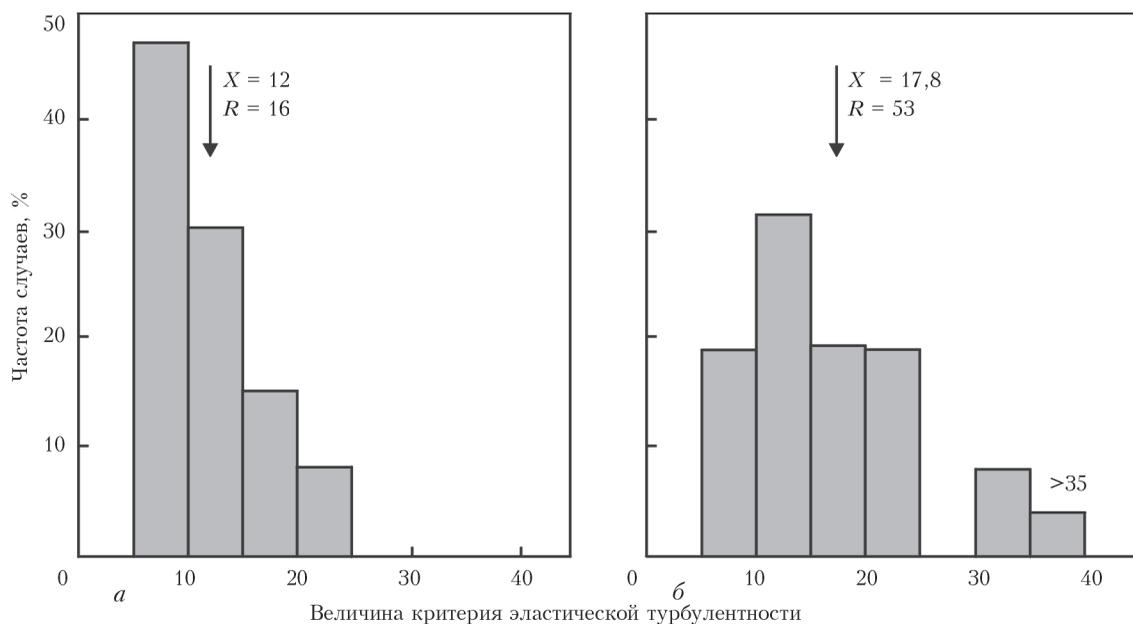


Рис. 12. Статистическое распределение значений De как характеристики угла естественной конвергенции напорных потоков обмачочных масс С2 (а) и Н2 (б), экструдированных из резервуаров с  $D_R = 10, 15$  и  $30$  мм через капилляры с  $d_c = 2, 4$  и  $6$  мм ( $X$  — среднее выборочное значение,  $R$  — выборочный размах)

функции  $\eta(\dot{\gamma}_c)$  над способной вызвать упругие возмущения функцией  $\xi(\dot{\gamma}_c)$  можно считать достаточным для предупреждения возможности зарождения пульсирующего потока, но не всегда для того, чтобы полностью подавить такую возможность. Это подтверждается видом экструзионных кривых, частичными релаксациями упругих напряжений в виде сбросов давления, а также существенным рассеянием результатов.

Накопление упругих напряжений сопровождается уменьшением угла естественной конвергенции потока  $\alpha_0$ . На рис. 11 приведено влияние критерия эластической турбулентности  $De$  в потоках обмазок С2 (а) и Н2 (б) на величину  $\alpha_0$ . Видно, что вязкая обмазка характеризуется значительно меньшим рассеянием показателя эластической турбулентности и связанной с ним величиной  $\alpha_0$ , чем низковязкая обмазка. Это подтверждается и приведенной на рис. 12 статистической оценкой полученных результатов.

Таким образом, следует ожидать, что с точки зрения повышения стабильности течения обмазок, предназначенных для покрытия сварочных электродов, могут быть полезными подходы, используемые для достижения аналогичных целей в технологии экструдирования полимерных материалов. Они базируются на представлениях о существовании неразрывной связи между двумя эффектами, специфичными для полимерных систем, а именно: появлением при увеличении скорости деформации так называемой аномалии вязкости при течении, с одной стороны, и возникновением нормальных напряжений, вызванных накоплением обратимых деформаций, с другой стороны. Нормальные напряжения в определенном диапазоне довольно медленных деформаций способны спровоцировать разного рода нестабильности потока. Предупредить их появление можно, если нормальные напряжения демпфируются вязкостью системы. Такая возможность имеется благодаря тому, что эффективная вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации медленнее, чем коэффициент нормальных напряжений [12].

### Выводы

1. С использованием модели прямого ступенчатого канала, имитирующего условия течения электродных обмазочных масс в измерительной ячейке капиллярного вискозиметра или формирующей головки электрообмазочного пресса, исследована структура и реологические характеристики неизотермического потока обмазок для низководородных электродов. Обмазки, одна с вязким, другая — с низковязким жидким стеклом, существенно различались между собой степенью структурированности, соотношением вязкости и

упругости и стойкостью против возникновения нестабильностей в напорных потоках.

2. Установлено, что сравниваемые обмазки по-разному реагируют на режимы капиллярного тестирования, которые регулировали, изменяя секундные расходы или степень редуцирования струи. Обмазка с низковязким стеклом более структурирована и потому менее склонна к диссипативному разогреву, чем ее вязкий аналог, поскольку часть затраченной на течение энергии расходуется на разрушение структуры. С другой стороны, названные выше способы регулирования режимов течения тоже неадекватны друг другу: повышение скорости редуцированием струи вызывает меньший ее разогрев, чем увеличение секундного расхода обмазки, независимо от способа редуцирования — увеличением ли сечения резервуара или уменьшением сечения капилляра.

3. Конкуренция упругих и вязких начал провоцирует разного рода нерегулярности в напорных потоках обмазочных масс. Они выявляются визуализацией (как изменения картины течения), на зарегистрированных экструзионных кривых (как иррегулярности и срывы потока), на кривых течения (как разная степень их неинвариантности) и как изменения суммарных потерь напора, вызванные релаксацией упругих напряжений. При этом упругость следует считать провоцирующим, а вязкость — демпфирующим фактором. Вязкостный разогрев повышает вероятность возникновения нестабильностей, поскольку, как и скорость течения, разрушая структуру обмазки, понижает ее вязкость.

4. Место возникновения нестабильностей — резервуар и капилляр. Роль каждой стадии к появлению, к примеру, нестабильности общих потерь напора в резервуаре и капилляре, в работе предложено учитывать в виде функции комплексного аргумента  $\omega$  как среднего геометрического градиентов скоростей сдвига в резервуаре и капилляре. Такой подход позволил выявить критический диапазон режимов напорного течения, в пределах которого функция  $P_L(\omega)$  исключительно неинвариантная. За пределами этого диапазона кривые течения  $P_L(\omega)$  имеют инвариантный вид.

5. Соотношение вязких и упругих свойств сопоставляемых обмазок следует оценивать, сравнивая сдвиговую вязкость  $\eta$  с модулем упругости  $G$ , с одной стороны, и сдвиговую вязкость с коэффициентом первой разности упругих напряжений  $\xi$ , с другой стороны. Равенство показателей  $\eta$  и  $G$  в первом соотношении — необходимое условие для появления возмущений в капиллярном потоке. Возникнут ли они на самом деле и будут ли продолжительными, определяется по значению соотношения  $\eta/\xi$  в момент времени, когда  $\eta = G$ . Если  $\eta > \xi$ ,

возмущения, даже возникнувшие, например, в виде пульсации потока, не могут быть продолжительными, поскольку динамическая вязкость демпфирует упругость, представленную аналогичным по смыслу коэффициентом  $\xi$ . Значения коэффициентов  $\eta$  и  $\xi$  уменьшаются по мере увеличения градиента скорости сдвига, второго из них — круче, чем первого. В графическом виде функции  $\eta(\dot{\gamma}_c)$  и  $\xi(\dot{\gamma}_c)$  пересекаются. Справа от точки пересечения выполняется условие  $\eta > \xi$  тем в большей мере, чем выше  $\dot{\gamma}_c$ , и даже когда  $\eta = G$ , возникшее возмущение будет кратковременным или осуществится в виде индивидуального срыва струи. Слева от точки пересечения функций  $\eta(\dot{\gamma}_c)$  и  $\xi(\dot{\gamma}_c)$  выполняется условие  $\eta < \xi$  и это открывает широкие возможности для возникновения продолжительных возмущений.

6. Виды и, особенно, интенсивность возмущений в напорных потоках обмазочных масс зависят от способа регулирования их скорости: редуцированием струи  $\beta$  или скоростью нагнетания обмазки в зону редуцирования плунжером. Увеличением  $\beta$  благодаря большим диаметрам резервуаров наряду с меньшим разогревом обмазки, ослабляется влияние периферийных упругих зон на предкапиллярное пространство, в котором формируется струя, понижается уровень запасенной упругой энергии и, следовательно, инвариантность кривых течения. Наряду с этим, повышается доля деформации материала растяжением, которая облегчает поддержание стабильного потока. Чем больше диаметр резервуара, тем меньше давление, необходимое для обеспечения стабильного напорного потока обмазочных масс.

7. Обмазочные массы, изготовленные на низковязком жидком стекле, в большей мере склонны к возникновению возмущений в напорных потоках, нежели их вязкие аналоги.

1. Соколов Е.В. Электроды с качественным покрытием и их производство // Автоген. дело. – 1950. – № 11. – С. 26–29.
2. Марченко А.Е. Разнотолщинность покрытия как следствие эластической турбулентности электродных обмазочных масс в состоянии неизотермического напорного потока. // Автоматич. сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 182–194.
3. Марченко А.Е. Влияние зернового состава шихты на реологические характеристики и структуру напорного потока обмазочных масс для низководородных электродов // Автомат. сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 167–175.
4. Марченко А.Е. Исследование вязкоупругих характеристик электродных обмазочных масс в состоянии напорного течения сквозь цилиндрические формующие насадки: Сварочные материалы 2015. Петраньевские чтения // Сб. докл. Санкт-Петербургской междунард. науч.-техн. конф. 15–17 окт. 2015 г. – С. 79–89.
5. Марченко А.Е., Гнатенко М.Ф. Особенности течения электродных обмазочных масс, обнаруженные капиллярным пластометром // Информ. материалы (СЭВ. Координац. центр по пробл. «Развитие научных основ и разработок новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создания эффективных сварочных материалов и оборудования»). – Киев, 1980. – Вып. 1. – С. 106–117.
6. Марченко А.Е. О тепловой обстановке, создаваемой вязкостным разогревом электродной обмазочной массы, в зоне формирования напорного потока: Сварочные материалы 2015. Петраньевские чтения // Сб. докл. Санкт-Петербургской междунард. науч.-техн. конф. 15–17 окт. 2015 г. – С. 65–78.
7. Перлин И.Л. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 344 с.
8. Течение полимеров в отверстиях фильер. Теория, расчет, практика / В.И. Янков, И.О. Глот, Н.М. Труфанова, Н.В. Шакиров. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. – 368 с.
9. Georgios G. Stick-Slip Instability // Polymer melts instabilities. control and understanding. (Ed. By S.S. Hatzikiriaks, K.K.Migler). – М.: Dekker. N.Y., 2005. – P. 176–221.
10. Philippoff W., Gaskins F.H. The capillary experiment in rheology // Trans. Soc. Rheol. II. – 1958. – P. 263–284.
11. Nonlinear dynamics of viscoelastic flow in axisymmetric abrupt contractions / G.H. McKinley, W.P. Raiford, R.A. Brown, R.C. Armstrong // J. Fluid Mech. – 1991. – 223. – P. 411–456.
12. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. – М.: Химия, 1977. – 440 с.

Поступила в редакцию 30.11.2015

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей. – Київ: Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. – 816 с. (електронне видання <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winresurs2015>).

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2013–2015 рр., до реалізації якої було залучені інститути НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин

