

УДК 532.5, 677.494

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КРУГЛЫХ СТРУЙ СЛАБОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО РАСТВОРА ПОЛИМЕРА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ В НЕПОДВИЖНЫЙ ВОЗДУХ

Л. Ф. Юй, Ч. Г. Цзо*, Л. Ли, Ш. Х. Лю*, Ш. Т. Чжао

Исследовательский институт химической защиты, Пекин, Китай

* Университет Цинхуа, Пекин, Китай

E-mails: fhyulf86@163.com, zhigang200@tsinghua.edu.cn, rocksys_15@163.com,
liushuhong@tsinghua.edu.cn, zhaoshoutian@yeah.net

Приведены результаты экспериментального исследования разрушения струй слабоконцентрированного полимерного раствора, вытекающих из сопла в неподвижный воздух со скоростями $30 \div 87$ м/с. Полимерный раствор представляет собой растворенный в дистиллированной воде полиэтиленоксид с длинными цепочками, относительная молекулярная масса которого равна нескольким миллионам. Концентрация раствора составляет порядка 10^{-4} . Процесс разрушения струи регистрировался высокоскоростной камерой через четыре окна, установленные вдоль струи. Показано, что характер разрушения струи слабоконцентрированного полимерного раствора отличается от характера разрушения струи ньютоновской жидкости. Обнаружено, что маломасштабные межфазные возмущения подавляются, в то же время наблюдается закрученный столб жидкости, колеблющийся с большой амплитудой. При значении скорости струи, превышающем критическое значение, происходит отслоение с поверхности струи жидких пленок и волокон. Обнаружено четыре типа разрушения струи. Установлено, что диаметры основного столба жидкости и волокон жидкости уменьшаются с увеличением скорости струи.

Ключевые слова: полимер, круглая струя, моды разрушения, межфазные возмущения, нерелаксированные напряжения.

DOI: 10.15372/PMTF20200422

Введение. В последнее время возрастает интерес к исследованию разрушения струй неньютоновских жидкостей. Жидкие растворы с небольшим количеством макромолекул полимеров обладают вязкоупругими свойствами [1]. Вязкоупругие струи применяются в различных инженерных областях: лазерная печать [2], струйное покрытие [3], химическая обработка продуктов сельского хозяйства [4], электроспиннинг [5]. Известно, что разрушение струй ньютоновских жидкостей обусловлено развитием нелинейных возмущений вследствие взаимодействия струи и окружающего газа. Эти неустойчивые растущие волны (как правило, короткие в осевом направлении волны), распространяясь вниз по течению, создают сложное турбулентное течение, в результате чего в струе образуются перемычки и капли [6]. Структура вязкоупругих струй более сложная, чем структура струй

Работа выполнена в рамках Национальной программы исследований Китая (код проекта 2018YFB0606103).

© Юй Л. Ф., Цзо Ч. Г., Ли Л., Лю Ш. Х., Чжао Ш. Т., 2020

ньютоновской жидкости. Определяющие соотношения для вязкоупругих жидкостей достаточно сложны, поскольку в них учитываются зависимость вязкости от скорости сдвига и эффекты упрочнения [7]. Вследствие наличия упругих напряжений в потоке возникают области, в которых скорости деформаций сдвига или продольных деформаций превышают критические значения. Изучению механизма разрушения вязкоупругих струй посвящено большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ. Исследовались также процесс образования капель и их распределение в струе.

В работах [8, 9] с использованием линейной теории устойчивости установлено, что низкоскоростная ламинарная вязкоупругая струя менее устойчива, чем струя ньютоновской жидкости. Предполагалось, что нелинейный эффект возникает вследствие появления нормальных напряжений в сдвиговом потоке до выброса струи. Это предположение противоречит результатам многих экспериментальных исследований, поскольку вязкоупругая струя, как правило, распадается на капли за больший промежуток времени, чем струя ньютоновской жидкости [10]. В работе [11] при исследовании влияния сил поверхностного натяжения на разрушение вязкоупругой струи использовалась линейная теория неустойчивости. Установлено, что в случае большого времени релаксации напряжений упругое растяжение в осевом направлении может быть существенным фактором, стабилизирующим струю. В [12] с использованием линейной теории устойчивости исследовано влияние нерелаксированных упругих напряжений растяжения на неустойчивость вязкоупругой струи. Обнаружено, что в результате релаксации упругой энергии появляются новые моды колебаний, вызывающие неосесимметричную деформацию. В работе [13] в квазиодномерной постановке исследовано стабилизирующее действие на струю осевых напряжений. Установлено, что, в случае если модуль упругости достаточно большой, осевые напряжения оказывают на струю более существенное стабилизирующее действие, чем динамическое давление окружающего газа. На нелинейной стадии рост изгибных возмущений в полимерной струе резко замедляется под действием внутренних напряжений, вызванных удлинением струи в осевом направлении. Экспериментально установлено, что добавление небольшого количества полимера с большой молекулярной массой в жидкость с малой вязкостью приводит к замедлению распыления струи (см., например, [14]). Разрушение струи сопровождается образованием волокон (нитей), связывающих капли между собой. Наличие полимеров в растворе приводит к подавлению мелкомасштабных возмущений на поверхности струи, однако крупномасштабные возмущения при этом не только не уменьшаются, но даже увеличиваются. В работах [15, 16] экспериментально исследовался механизм распыления струи, вызванного движением воздуха. Изучалась неустойчивость вязкоупругих струй трех типов: Кельвина — Гельмгольца, Рэлея — Тейлора и Рэлея — Плато. Установлено, что с увеличением вязкости размер капель монотонно увеличивается. Распределение размера капель относительно среднего размера описывается гамма-распределением с показателем $n = 4$.

Таким образом, в опубликованных ранее работах основное внимание уделялось изучению капиллярного разрушения вязкоупругих струй. Выполнено небольшое количество экспериментальных исследований межфазного разрушения вязкоупругой струи и начальной стадии ее разрушения. Вследствие математической сложности задачи, обусловленной наличием нелинейных определяющих реологических соотношений, количество теоретических работ и работ, в которых применяются численные методы, невелико. Количество работ, посвященных изучению высокоскоростных струй, также невелико.

В данной работе с использованием высокоскоростной съемки исследуется разрушение вязкоупругих высокоскоростных струй.

1. Методика эксперимента. Эксперименты проводились при комнатной температуре (20 °C) и нормальном атмосферном давлении. Основными элементами эксперимен-

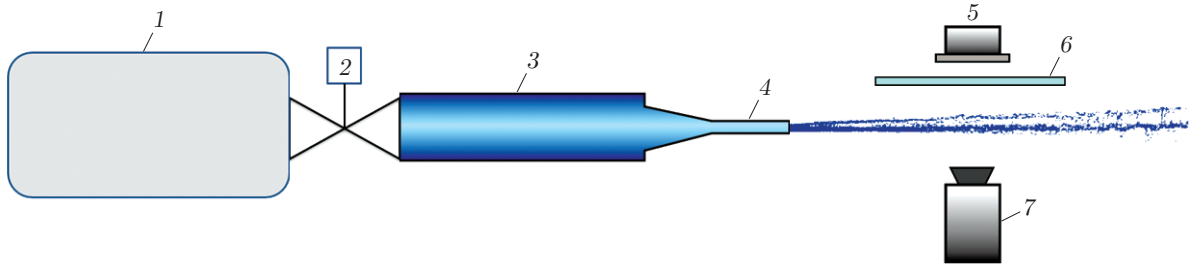


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — бак со сжатым воздухом, 2 — электромагнитный клапан, 3 — эжекторная трубка, 4 — сопло, 5 — светодиодная лампа, 6 — матовое стекло, 7 — высокоскоростная камера

тальной установки являются заполненная жидкостью эжекторная трубка объемом 50 мл, цилиндрическое сопло, напорный бак объемом 2 л, электромагнитный клапан (рис. 1). Поршень эжекторной трубки приводится в действие в результате создания перепада давления в напорном баке. Эжекторная трубка и напорный бак соединены электромагнитным клапаном, время срабатывания которого составляет 10 мс. Для визуализации струи используется высокоскоростная камера. Поле обзора освещается светодиодной лампой мощностью 800 Вт. Для создания равномерного освещения используется матовое стекло. Съемка струи проводится с помощью камеры Phantom v2511 с частотой дискретизации 48 000 кадр/с. Диаметр цилиндрического сопла составляет 1 мм, отношение его длины к диаметру равно 5. Для наблюдения за структурой струи и ее разрушением вдоль струи было установлено четыре окна на различных расстояниях от выходного сечения сопла: 0 ÷ 180 мм (окно I), 180 ÷ 360 мм (окно II), 360 ÷ 540 мм (окно III), 100 ÷ 130 мм (окно IV).

Концентрация растворов полиэтиленоксида (ПЭО) с различной молекулярной массой M_v , их реологические свойства, а также характеристики ньютоновских жидкостей, используемых в эксперименте, приведены в таблице. Поверхностное натяжение σ измерялось прибором Dataphysics OCA20 с погрешностью 1 %, вязкость при сдвиге η_0 — реометром Antonpa MCR302 с погрешностью 0,1 %. Эффективное время релаксации λ_{eff} вычислялось по формуле [16]

$$\lambda_{eff} = 0,463 \frac{\eta M_w \eta_s}{N_A k_B T} \frac{c}{c^*}, \quad 0,01 \leq \frac{c}{c^*} \leq 1,00, \quad (1)$$

где η — характеристическая вязкость полимера; η_s — вязкость растворителя; N_A — число Авогадро; k_B — постоянная Больцмана; T — температура раствора; c — массовая доля полимера; c^* — критическая массовая доля; M_w — среднемассовая молекулярная масса (приблизительно эквивалентная средневязкостной молекулярной массе M_v). В случае жидкости с малой вязкостью можно использовать критерий Рэлея разрушения невязкой струи. Характерное время разрушения определяется по формуле [15]

$$t_R = \sqrt{\rho R_0^3 / \sigma},$$

где ρ — плотность жидкости; R_0 — радиус поперечного сечения струи; σ — коэффициент поверхностного натяжения. Числа Деборы De и Рейнольдса Re определяются по формулам [15]

$$De = \frac{\lambda_{eff}}{t_R} = \frac{\lambda_{eff}}{\sqrt{\rho R_0^3 / \sigma}}, \quad Re = \frac{\rho v R_0}{\mu}.$$

Реологические характеристики жидкостей, используемых в эксперименте

Жидкость	c , %	$\eta \cdot 10^{-2}$, мл/г	c/c^*	η_s , мПа·с	η_0 , мПа·с	σ , мН/м	λ_{eff} , мс
Раствор ПЭО:							
$10^6 M_v$	0,05	5,72	0,31	1	1,21	62,3	0,88
$2 \cdot 10^6 M_v$	0,05	5,72	0,48	1	1,41	60,9	4,12
$5 \cdot 10^6 M_v$	0,01	5,72	0,18	1	1,45	60,7	5,11
$5 \cdot 10^6 M_v$	0,02	5,72	0,35	1	1,61	61,2	7,85
$5 \cdot 10^6 M_v$	0,05	5,72	0,88	1	4,96	60,8	14,31
Раствор глицерина	60,00	—	—	—	10,02	51,6	—
Дистиллированная вода	—	—	—	—	1,00	72,1	—

2. Результаты исследования и их обсуждение. Изучалось разрушение струи полимерного раствора при изменении числа Рейнольдса в диапазоне $Re = 6100 \div 70700$ и числа Деборы в диапазоне $De = 0,2 \div 3,5$. Исследовалась структура струй дистиллированной воды, раствора глицерина и раствора ПЭО (молекулярная масса $M = 5 \cdot 10^6 M_v$, концентрация $\bar{c} = 2 \cdot 10^{-4}$), истекающих из сопла со скоростью 76 м/с, а также структура струй раствора ПЭО ($M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 2 \cdot 10^{-4}$), истекающих со скоростями 47, 68, 87 м/с. Получены зависимости диаметра основного столба жидкости и диаметра основных волокон от скорости струи.

2.1. *Структура струй ньютоновских и вязкоупругих жидкостей.* На рис. 2 показана структура струй ньютоновских жидкостей (дистиллированной воды, раствора глицерина) и раствора ПЭО ($M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 2 \cdot 10^{-4}$), истекающих из сопла со скоростью 76 м/с. Первоначально струи дистиллированной воды и раствора глицерина являются прозрачными, течение в них ламинарное. Затем струи становятся непрозрачными, в них развиваются возмущения, течение переходит в турбулентное. Амплитуда волн возмущения растет в пространстве и времени с большой скоростью. Вдоль струи возмущения распространяются под различными углами. При разрушении струи в некоторых областях образуются крупные (основные) капли, которые затем под действием аэродинамических сил распадаются на мелкие (сателлиты). Этот процесс называется вторичным распылением.

В струе дистиллированной воды возмущения развиваются непосредственно после выхода из сопла. Угол расхождения струи составляет приблизительно $2,5^\circ$ (окно I на рис. 2, а). Видно, что струя полностью возмущена, образовались крупные и мелкие капли (окно II). Большое количество мелких капель (окно III) свидетельствует о полном распылении струи.

В струе раствора глицерина возмущения появляются на расстоянии от выхода из сопла, равном 6 мм. Угол расхождения струи составляет приблизительно $1,5^\circ$ (окно I на рис. 2, б). Видно, что струя возмущена не полностью (окно II). По сравнению со струей дистиллированной воды в струе раствора глицерина наблюдается большее количество крупных капель и меньшее количество мелких капель. Таким образом, при одной и той же скорости степень фрагментации струи глицерина меньше степени фрагментации струи дистиллированной воды. Этот вывод согласуется с результатами проведенных ранее исследований, из которых следует, что при наличии вязкости возмущения подавляются.

Струя раствора полимера является существенно более устойчивой по сравнению со струями ньютоновских жидкостей. Угол ее расхождения составляет $0,5^\circ$, что значительно меньше угла расхождения струи раствора глицерина. Область ламинарного течения сохраняется на расстоянии от выхода из сопла, составляющем не менее 50 мм. Струя раствора полимера сохраняет достаточно гладкую цилиндрическую форму. Это свидетельствует о том, что рост возмущений подавляется вследствие наличия в струе полимеров. На рис. 2, в видно, что мелкие капли отсутствуют, однако образуются пленки жидкости,

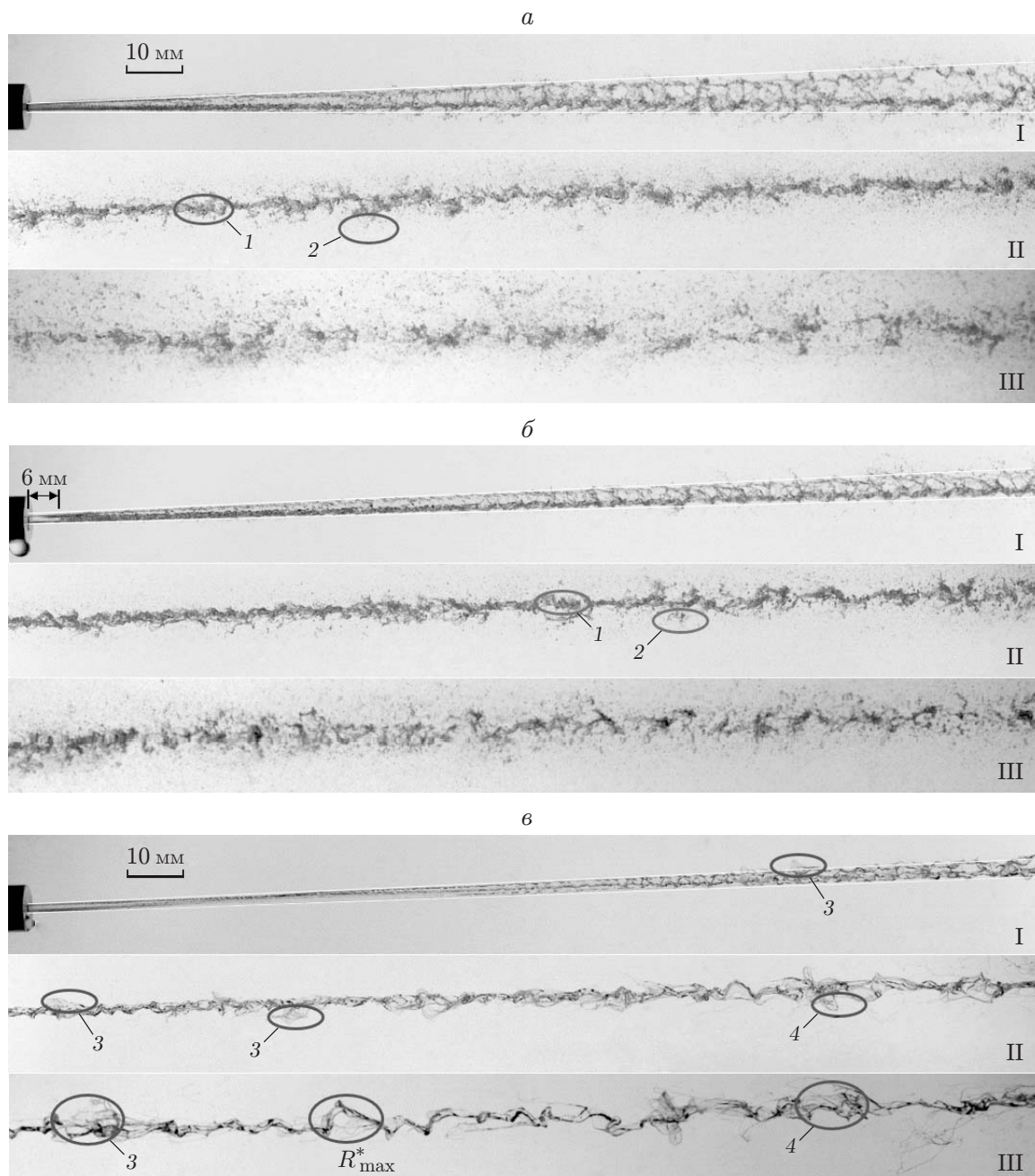


Рис. 2. Струя, истекающая со скоростью 76 м/с из сопла диаметром 1 мм:
а — дистиллированная вода, *б* — раствор глицерина, *в* — раствор ПЭО ($M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 2 \cdot 10^{-4}$); I–III — окна I–III; 1 — основные капли, 2 — сателлиты, 3 — жидкие пленки, 4 — волокна (нити) жидкости

соединенные с основной струей (окно I). В окне II видна неразрушенная струя, капли не образуются, но образуются жидкие пленки и нити, соединенные с основной струей. Струя имеет вид закрученного столба жидкости с большой амплитудой колебаний. В окне III видно, что столб жидкости не разрушен, несмотря на то что отношение амплитуды возмущения к начальному диаметру струи превышает 4. Это свидетельствует о наличии в струе нерелаксированных растягивающих упругих напряжений. Можно утверждать, что возмущение с большой амплитудой является новой модой колебаний, обнаруженной в работе [12]. Наблюдаются пленки большого размера и тонкие нити, соединенные с основной струей.

2.2. Особенности разрушения струй полимерного раствора при различных скоростях истечения. На рис. 3 показаны струи раствора ПЭО ($M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 2 \cdot 10^{-4}$), истекающие со скоростями 47, 68, 87 м/с. Струя, истекающая со скоростью 47 м/с, сохраняет цилиндрическую форму (окно I на рис. 3,а). На поверхности струи появляются маломасштабные возмущения. Однако эти возмущения подавляются, поскольку вниз по течению струя вновь становится гладкой. Затем амплитуда возмущений возрастает (окно II), столб жидкости становится возмущенным вниз по течению. Возмущения увеличиваются, в результате чего образуется закрученный столб жидкости с большой амплитудой колебаний (окно III).

Струя раствора полимера, вытекающая со скоростью 68 м/с, показана на рис. 3,б. Маломасштабные возмущения появляются значительно ближе к соплу, чем в случае струи, вытекающей со скоростью 47 м/с. Возмущения увеличиваются, небольшие фрагменты жидких пленок отделяются от струи (окно I). Амплитуда возмущений существенно возрастает. Длина волны возмущений увеличивается, и от струи отделяются крупные фрагменты пленок (окно II). В окне III видны закрученный столб жидкости и большое количество жидких пленок.

Струя полимерного раствора, вытекающая со скоростью 87 м/с, показана на рис. 3,в. Видны сильные возмущения, в результате которых образуется полая расходящаяся струя (окно I). Однако струя еще не разрушена, на ее поверхности появляется небольшое количество пленок. В окне II видны крупные фрагменты пленок и множество тонких нитей. В окне III виден закрученный столб жидкости с возмущениями большой амплитуды. Нити становятся длиннее и тоньше, они переплетаются и образуют структуру, подобную сетке.

Высокая устойчивость струй вязкоупругой жидкости объясняется возникновением в них до момента выхода из сопла напряжений, поскольку до момента истечения струи из сопла в полимерных молекулах появляются большие деформации сдвига и растяжения. Остаточные напряжения могут сохраняться в струе на большом расстоянии от сопла, зависящем от времени релаксации и скорости струи. Несмотря на то что с увеличением расстояния от сопла напряжения убывают по экспоненциальному закону, они оказывают существенное стабилизирующее воздействие на возникающие возмущения. Наличие закрученного столба жидкости с возмущениями большой амплитуды свидетельствует о наличии нерелаксированных растягивающих напряжений. В результате взаимодействия струи и окружающего газа появляются сдвиговые силы, вследствие чего образуются пленки и волокна (нити). Под действием растягивающих напряжений возникают большие деформации полимерных молекул, что приводит к нелинейному процессу образования шеек. Растягивающие напряжения препятствуют запирающему действию капиллярных сил, замедляют процесс разрушения струи, вдоль нее образуются пленки большого размера и длинные волокна.

2.3. Типы разрушения вязкоупругих струй. Структура струй полимерных растворов зависит от скорости их истечения из сопла. Для определения типа разрушения струи на расстоянии 10 см от выходного сечения сопла было размещено окно IV. В зависимости от

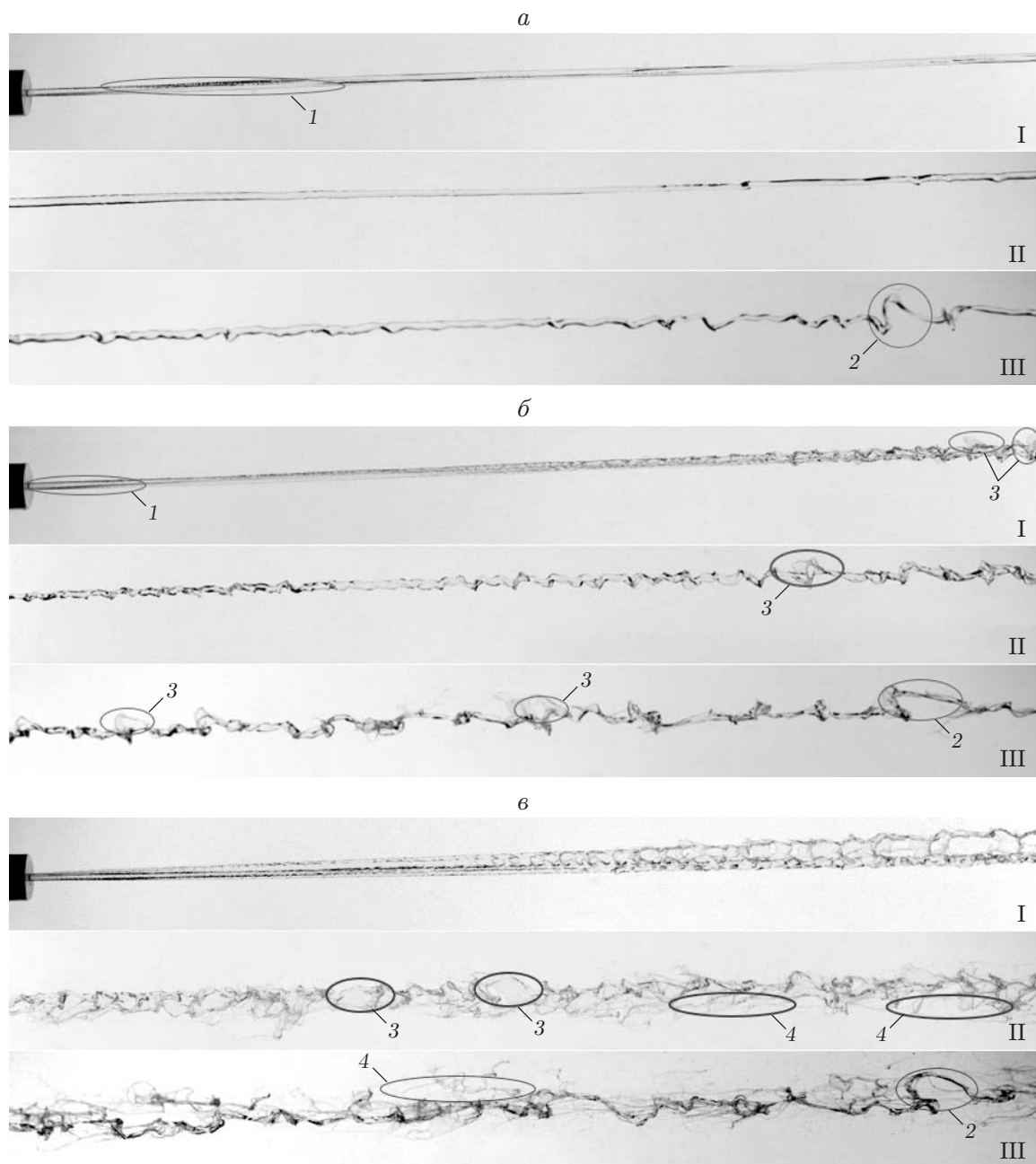


Рис. 3. Струя раствора ПЭО ($M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 2 \cdot 10^{-4}$), вытекающая со скоростью 47 м/с (а), 68 м/с (б) и 87 м/с (в):

I–III — окна I–III; 1 — маломасштабные возмущения, 2 — закрученный столб жидкости, 3 — жидкие пленки, 4 — волокна (нити) жидкости

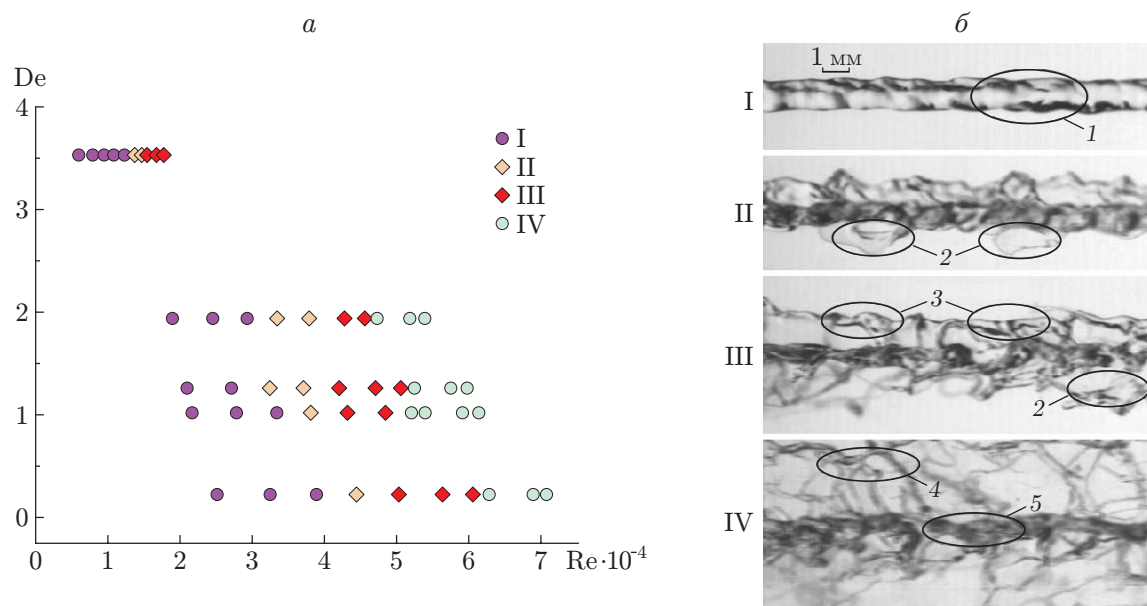


Рис. 4. Фазовая диаграмма разрушения струй полимерного раствора (*a*) и разрушенные струи (*б*):

I — отсутствие жидких пленок и волокон; II — наличие жидких пленок; III — наличие жидких пленок и волокон; IV — наличие структуры, подобной сетке из волокон; 1 — возмущения различной формы, 2 — жидкие пленки, 3 — волокна (нити) жидкости, 4 — основное волокно (нить) жидкости, 5 — основной столб жидкости

концентрации и средневязкостной молекулярной массы M_v выделено четыре типа разрушения струй раствора ПЭО: 1) отсутствие жидких пленок и волокон; 2) наличие жидких пленок; 3) наличие пленок и волокон; 4) наличие структуры, подобной сетке из волокон. Исследовалось разрушение струи раствора ПЭО ($M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 10^{-4}$) при различных скоростях истечения из сопла.

На рис. 4 приведена фазовая диаграмма разрушения. Обнаружено, что с увеличением числа Деборы De и уменьшением числа Рейнольдса Re струя становится более устойчивой вследствие увеличения времени релаксации упругих напряжений.

В отсутствие пленок и нитей жидкости струя имеет следующую структуру. Столб жидкости не разрушен, на поверхности струи имеются симметричные или антисимметричные возмущения. Столб жидкости практически однороден, и амплитуда возмущений мала. Не происходит отслоения пленок или нитей с поверхности струи. При наличии жидких пленок диаметр столба жидкости равен начальному диаметру струи, несколько крупных жидких пленок иногда отслаиваются от поверхности струи под действием сил сопротивления, возникающих вследствие различия скоростей жидкости и газа. Нити жидкости не образуются. При наличии как жидких пленок, так и нитей жидкости крупные пленки и длинные нити часто отслаиваются от поверхности струи. Амплитуда возмущений становится достаточно большой, диаметр столба жидкости значительно меньше начального диаметра струи. Длинные тонкие нити, образовавшиеся на поверхности струи, переплетаются, образуя трехмерную сетчатую структуру.

2.4. *Закономерности изменения диаметров основного столба жидкости и основных волокон жидкости.* Диаметр основного столба жидкости обозначим D_{col} , диаметр основного волокна жидкости — D_{fil} . Величины D_{col} и D_{fil} измерялись для струй раствора ПЭО, истекающих из сопла с различными скоростями. Диаметры вычислялись путем определе-

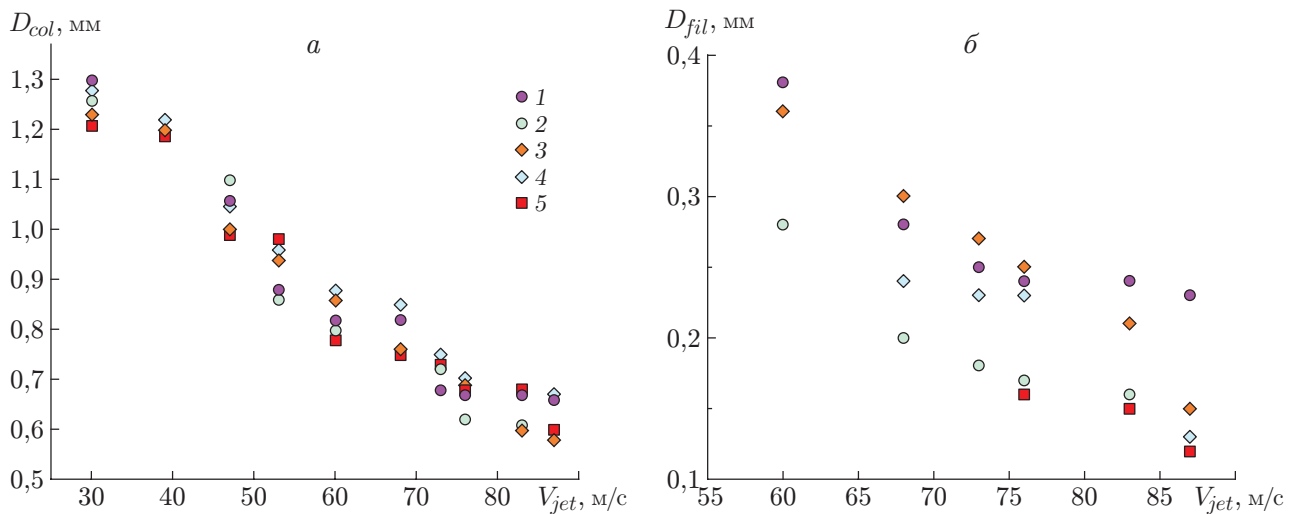


Рис. 5. Зависимости диаметров основного столба жидкости D_{col} (а) и основного волокна жидкости D_{fil} (б) в растворе ПЭО от скорости струи V_{jet} :

1 — $M = 10^6 M_v$, $\bar{c} = 5 \cdot 10^{-4}$, 2 — $M = 2 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 5 \cdot 10^{-4}$, 3 — $M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 10^{-4}$, 4 — $M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 2 \cdot 10^{-4}$, 5 — $M = 5 \cdot 10^6 M_v$, $\bar{c} = 5 \cdot 10^{-4}$

ния количества пикселей, содержащихся в областях, занимаемых основным столбом жидкости и основным волокном жидкости, с использованием высокоскоростной камеры. На фотографии выбиралось 50 точек, расположенных вдоль струи, среднее число точек использовалось для определения диаметра. Абсолютная погрешность определения диаметров зависит от погрешности определения положения границы области, занимаемой основным столбом жидкости или основным волокном жидкости, которая составляет 2 пикселя. Поэтому погрешность определения положения обеих границ составляет 4 пикселя (с учетом разрешения камеры — 37 мкм).

На рис. 5 приведены зависимости диаметров D_{col} и D_{fil} от скорости струи. Видно, что диаметры D_{col} и D_{fil} уменьшаются с увеличением скорости струи. Более того, при одной и той же скорости струи диаметр волокон уменьшается с увеличением как молекулярной массы, так и концентрации раствора ПЭО. По-видимому, продольные напряжения оказывают более существенное влияние на запирающее свойство капиллярных сил в растворах ПЭО с большими молекулярной массой и концентрацией, поэтому в данном случае нити могут вытягиваться и становиться более тонкими.

Заключение. Экспериментально исследовано разрушение струй полимерных растворов.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Струя раствора с небольшой концентрацией полимера является существенно более устойчивой по сравнению со струей ньютоновской жидкости. Вязкоупругая струя сохраняет практически цилиндрическую форму на большом расстоянии от сопла. Маломасштабные возмущения подавляются полимером, при этом возникает закрученный столб жидкости, колеблющийся с большой амплитудой. Характер разрушения струи полимерного раствора отличен от характера разрушения струи ньютоновской жидкости. При достижении критического значения числа Рейнольдса происходит отслоение жидких пленок и волокон от поверхности струи. При больших скоростях струи волокна образуют сетчатую структуру.

Нерелаксированные осевые напряжения оказывают стабилизирующее воздействие на рост возмущений на начальной стадии движения. Пленки и волокна образуются под действием сдвиговых сил. Под действием растягивающих напряжений молекулы полимеров

существенно деформируются, вследствие чего образуются шейки. В результате процесс разрушения замедляется и образуются крупные жидкие пленки и длинные волокна.

Обнаружено четыре типа разрушения жидких струй. С увеличением скорости струи уменьшаются диаметры основного столба жидкости и основных волокон жидкости. При одной и той же скорости струи диаметры основных волокон уменьшаются при увеличении молекулярной массы полимера и концентрации раствора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Arnolds O., Buggisch H., Sachsenheimer D., Willenbacher N.** Capillary breakup extensional rheometry (CaBER) on semi-dilute and concentrated polyethyleneoxide (PEO) solutions // *Rheol. Acta*. 2010. V. 49, N 11. P. 1207–1217.
2. **Morrison N. F., Harlen O. G.** Viscoelasticity in inkjet printing // *Rheol. Acta*. 2010. V. 49, N 6. P. 619–632.
3. **Kulik V. M., Rodyakin S. V., Lee I., Chun H. H.** Deformation of a viscoelastic coating under the action // *Experiments Fluids*. 2005. V. 38, N 5. P. 648–655.
4. **Mun R. P., Young B. W., Boger D. V.** Atomisation of dilute polymer solutions in agricultural spray nozzles // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1999. V. 83, N 1. P. 163–178.
5. **Han T., Yarin A. L., Reneker D. H.** Viscoelastic electrospun jets: Initial stresses and elongational rheometry // *Polymer*. 2008. V. 49, N 6. P. 1651–1658.
6. **Eggers J., Villermaux E.** Physics of liquid jets // *Rep. Progress Phys.* 2008. V. 71, N 3. 036601.
7. **Negri M., Ciezki H. K.** Atomization of non-Newtonian fluids with an impinging jet injector: influence of viscoelasticity on hindering droplets formation // *Proc. of the 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conf., Nashville (USA), 25–28 July 2010*. S. l.: AIAA, 2010. P. 1–11.
8. **Middleman S.** Stability of a viscoelastic jet // *Chem. Engng Sci.* 1965. V. 20, N 12. P. 1037–1040.
9. **Goldin M., Yerushalmi J., Pfeffer R., Shinar R.** Breakup of a laminar capillary jet of a viscoelastic fluid // *J. Fluid Mech.* 1969. V. 38, N 4. P. 689–711.
10. **Gordon M., Yerushalmi J., Shinnar R.** Instability of jets of non-Newtonian fluids // *J. Rheol.* 1973. V. 17. P. 303–324.
11. **Goren S. L., Gottlieb M.** Surface-tension-driven breakup of viscoelastic liquid threads // *J. Fluid Mech.* 1982. V. 120. P. 245–266.
12. **Ruo A. C., Chen F., Chung C. A., Chang M. H.** Three-dimensional response of unrelaxed tension to instability of viscoelastic jets // *J. Fluid Mech.* 2011. V. 682. P. 558–576.
13. **Yarin A. L.** Free liquid jets and films: hydrodynamics and rheology. Haifa: Longman Sci. and Tech., 1993.
14. **Hoyt J. W., Taylor J. J., Runge C. D.** The structure of jets of water and polymer solution in air // *J. Fluid Mech.* 1974. V. 63, N 4. P. 635–640.
15. **Keshavarz B., Sharma V., Houze E. C.** Studying the effects of elongational properties on atomization of weakly viscoelastic solutions using Rayleigh Ohnesorge Jetting Extensional Rheometry (ROJER) // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2015. V. 222, N 8. P. 171–189.
16. **Keshavarz B., Houze E. C., Moore J. R., et al.** Ligament mediated fragmentation of viscoelastic liquids // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 117, N 15. 154502.

*Поступила в редакцию 11/XII 2019 г.,
после доработки — 10/II 2020 г.
Принята к публикации 2/III 2020 г.*