

На правах рукописи

Базилевский Александр Викторович

ДИНАМИКА И РАСПАД СТРУЙ СЛОЖНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Ильичев Андрей Теймуразович**, Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, ведущий научный сотрудник;

доктор физико-математических наук, профессор **Мелихов Олег Игорьевич**, Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС, заместитель директора по научной работе;

доктор физико-математических наук, **Баженов Сергей Леонидович**, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Защита состоится 31 марта 2016 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.240.01 при Институте проблем механики Российской академии наук по адресу: 119526 Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМех РАН.

Автореферат разослан «_____» февраля 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.240.01,
кандидат физико-математических наук

Е.Я.Сысоева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе экспериментально исследованы процессы капиллярного распада струй сложных (в реологическом смысле) жидкостей. Особенностью работы является не только регистрация форм распада струи, но и прямое измерение действующих в струе напряжений. Для этого разработано несколько оригинальных экспериментальных методов. Обнаружены гидродинамические эффекты и закономерности распада струй сложных жидкостей, и на основе этого созданы установки и приборы для реологического тестирования жидкостей в условиях растягивающих деформаций. Проведен анализ всех наблюдаемых явлений. Реализованы новые способы получения композитных микро/нановолокон и углеродных микро/нанотрубок и изучены особенности микротечений жидкости и газа через эти трубки.

Актуальность работы обусловлена широким распространением сложных жидкостей в природе и технике, разнообразием современных технологий, использующих свободные струи таких жидкостей, – от струйной печати до формирования нановолокон. Растворы полимеров, суспензии и эмульсии – наиболее известные примеры жидкостей данного типа. Картины их течения в ряде случаев кардинально отличаются от течений ньютоновской жидкости. Различия особенно заметны при элонгационных (растягивающих) деформациях жидкости, в то время как стандартные методы реологических измерений ориентированы преимущественно на сдвиговые течения. Капиллярный распад струи, являющийся преимущественно элонгационным течением, допускает, с одной стороны, достаточно простой теоретический анализ, а, с другой, – измерение всех необходимых кинематических и динамических характеристик потока. Поэтому исследование распада струй можно использовать в качестве метода изучения реологических свойств жидкостей при растяжении. Полученные в таких исследованиях данные о поведении жидкости могут затем быть использованы для анализа и расчета более сложных течений. В тоже время исследование распада струй сложных жидкостей представляет и большой самостоятельный научный интерес, так как наблюдаемые при этом фундаментальные гидродинамические эффекты являются прямым следствием особенностей реологического поведения жидкости.

Объектами исследования диссертации являются ламинарные свободные и тонкие (капиллярные) струи, движущиеся в маловязкой среде низкой плотности (воздухе), важным фактором гидродинамики которых являются силы поверхностного натяжения. Используемым в диссертации и автореферате терминам «жидкий мостик» и «нить» придается следующий смысл. Жидкий мостик – это перемычка между каплями на ранней стадии распада. Нить – это цилиндрический жидкий объект, соединяющий капли на поздней стадии распада непрерывной струи или одиночного жидкого мостика.

Цель работы – установление механизмов капиллярного распада струй сложных жидкостей, выявление роли реологических свойств жидкости, разработка на этой основе методов исследования поведения жидкости при растягивающих деформациях и их апробация в различных приложениях.

Направление исследований

1. Поиск струйных течений, включающих растяжение жидкости и допускающих контроль кинематических и динамических параметров потока.
2. Разработка экспериментальных методов регистрации распада струй.
3. Экспериментальные наблюдения распада струй различных жидкостей и поиск методов получения информации о напряжениях, действующих в струе.
4. Анализ механизмов распада струй жидкостей с различными определяющими уравнениями состояния.
5. Разработка методов, приборов, компьютерных алгоритмов и программ для оперативного измерения реологических характеристик жидкостей при растягивающих деформациях и их апробация на широком классе жидкостей.
6. Разработка и развитие способов получения микро/нановолокон и углеродных микро/нано трубок различной конфигурации.
7. Исследование возможности управления течением жидкости или газа через полученные макроскопически длинные углеродные микро/нанотрубки.

Методы исследований, достоверность и обоснованность результатов

Основным экспериментальным методом является высокоскоростная фотография и видеосъемка. Широко используется оптическая и электронная микроскопия. Цифровая фототехника высокого разрешения в сочетании с короткими временами экспозиции и компьютерной обработкой изображений позволяет регистрировать изучаемые процессы с высоким пространственным и временным разрешением. Помимо этого, в работе широко применяются цифровые методы сбора и анализа данных измерений на основе аналого-цифровых устройств и компьютерных программ. При построении теоретических моделей и анализе исследуемых явлений используются уравнения сохранения массы и импульса. Достоверность теоретических результатов подтверждается представлением данных прямых наблюдений распада струй.

На защиту выносятся

1. Методы исследования гидродинамики капиллярного распада струй и мостиков сложных жидкостей.
2. Эффекты взаимодействия нитей в полимерной струе или в жидком мостике с примыкающими каплями и их теоретический анализ.
3. Эффект образования зигзагообразной струи при истечении струи из поперечно колеблющегося сопла и его теоретическое описание.
4. Эффекты образования и распада горизонтального жидкого мостика (нити) и их анализ.

5. Закономерности капиллярного распада мостиков (нитей) растворов полимеров, суспензий компактных частиц и нанотрубок. Анализ физических механизмов разрыва нитей.
6. Способы получения композитных микро/нановолокон и полых углеродных микро/нанотрубок.
7. Реализация и закономерности течения жидкости и газа через пучки микро/нанотрубок.

Научная новизна

1. Разработаны методы измерения динамических характеристик струи и проведены измерения напряжений, действующих в распадающейся полимерной струе и жидком мостике (нити).
2. Обнаружены краевые эффекты взаимодействия нитей с примыкающими каплями и дано их физическое объяснение.
3. Получены необычные зигзагообразные формы распада струй и построен алгоритм расчета профилей таких струй.
4. Установлены особенности утончения горизонтальных нитей упруговязких жидкостей.
5. Созданы методики и приборы для реологического тестирования жидкости на основе слежения за распадом мостика (нити).
6. Разработан алгоритм определения констант реологической модели по экспериментально измеренной зависимости диаметра жидкого мостика (нити) от времени.
7. Экспериментально и теоретически исследованы закономерности утончения мостика (нити) растворов полимеров, суспензий частиц различной геометрии. Проанализированы физические механизмы разрыва нити.
8. Разработаны новые способы получения композитных микро/нановолокон и углеродных микро/нанотрубок, основанные на растяжении композитной полимерной струи в электрическом поле.
9. Разработан экспериментальный метод контроля течения жидкости или газа через пучки микро/нанотрубок. Изучены особенности таких течений. Предложен гидродинамический метод определения распределения диаметров микро/нанотрубок в пучке.

Практическая ценность работы

1. Выявленные в диссертации физические механизмы распада капиллярных струй и жидких мостиков могут найти применение при разработке и совершенствовании технологий, содержащих в качестве рабочего элемента струи или жидкие мостики: струйные принтеры, 3D принтеры, печатная микроэлектроника, нанесение покрытий, распыливание жидкостей, электроспиннинг нановолокон, производство лекарств и др.
2. Реологические свойства жидкостей, измеренные в режиме одноосного растяжения, могут быть использованы при построении новых реологических уравнений состояния жидкостей.

3. Созданные в работе экспериментальные методики реализованы в выпускаемом элонгационном реометре НААКЕ CaBER1 и используются для испытания жидкостей в режиме одноосного растяжения, для изучения физико-химических процессов в жидкостях, для медицинской диагностики и лечения, для разработки искусственных клапанов сердца.
4. Разработанные методы получения композитных микро/нановолокон и углеродных микро/нанотрубок перспективны для многочисленных приложений в микроэлектронике, медицине и др.
5. Полученные пучки макроскопически длинных микро/нанотрубок и обнаруженные закономерности течения в них жидкости и газа могут быть использованы при разработке различных микро/наноструйных устройств.

Апробация работы. Ниже представлен список публичных научных мероприятий, на которых были доложены материалы по теме диссертации: XI, XII, XIII, XV Всесоюзные симпозиумы по реологии (Суздаль – 1980, Рига – 1982, Волгоград – 1984, Одесса – 1990); V Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике (Алма-Ата – 1981); Всесоюзная конференция по струйным течениям жидкостей и газов (Новополоцк – 1982); III Всесоюзная конференция по механике аномальных жидкостей (Баку – 1982). Семинар «Гидродинамика разбавленных растворов высокомолекулярных систем» (Москва – 1982); Всесоюзное совещания «Применение неньютоновских систем для повышения нефтеотдачи в технологических процессах нефтегазодобычи» (Ухта – 1985); II Всесоюзное совещание по приборостроению в области коллоидной химии и физико-химической механики (Яремча – 1990); Всесоюзная конференция с международным участием «Релаксационные явления и свойства полимерных материалов» (Воронеж – 1990); Golden Jubilee Meeting of the British Society of Rheology and Third European Rheology Conference (Edinburgh, UK – 1990); Eighth International Congress of Biorheology (Yokohama, Japan – 1992); XVIII International Congresses of Theoretical and Applied Mechanics (Haifa – 1992); IIIrd International Symposium «Current Problems of Rheology, Biorheology and Biomechanics» (Moscow – 1992); International Conference «Porous Media-92» (Moscow – 1992); Seminars in DAMTP and/or ChED of Cambridge University (Cambridge, UK – 1993, 1996, 2000); Seminars in Hewlett Packard Laboratories (Palo Alto and Corvallis, USA – 1993); Seminar in Stanford University (Stanford, USA – 1993); Fourth European Rheology Conference (Sevilla, Spain – 1994); Euromech, European Mechanics Society, Colloquium 355, Interfacial Instabilities (Paris, France – 1996); ASME Symposium on Rheology & Fluid Mechanics of Nonlinear Materials (Atlanta, USA – 1996); Seminars in Isaac Newton Mathematical Institute and Cavendish Laboratory (Cambridge, UK – 1996); NIP13, NIP14: International Conferences on Digital Printing Technologies (Seattle, USA – 1997, Toronto, Canada – 1998); Seminar in Royal Institute of Technology (Stockholm, Sweden – 1997); Выставка РАН «Экология. Здравоохранение» (Москва – 1998); Seminar in Schlumberger company (Cambridge, UK – 2000); 4th Euromech Nonlinear Oscillations Conference (Moscow – 2002); XXI, XXII Symposiums on Rheology (Ostashkov – 2002, Valday – 2004); Third International

Symposium on Contact Angle, Wettability and Adhesion (Providence, Rhode Island, USA – 2002); ASME IMECE Microfluids Symposium (New Orleans, USA – 2002); XVI European Chemistry at Interface Conference (Vladimir – 2003); The Society of Rheology 78th Annual Meeting (Portland, Maine, USA – 2006); 3-я Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск – 2008); EUROMECH. 8th European Fluid Mechanics Conference (Bad Reichenhall, Germany – 2010); X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород – 2011); XXVII Симпозиум по реологии (Тверь – 2014); XIX Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта – 2015); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань – 2015); Семинары лабораторий Термогазодинамики, Прикладной механики сплошных сред, Сложных жидкостей ИПМех РАН (1984 – 2015).

Результаты по теме диссертации получены в ходе выполнения исследовательских работ в рамках плановых тем ИПМех РАН; грантов РФФИ № 93-013-17689, № 99-01-00474, №12-08-00067а, № 15-08-01365а; грантов Международного научного фонда № М69000, М69300; гранта INTAS № 93-0279; научного сотрудничества ИПМех РАН с Hewlett Packard Laboratories, University of Illinois at Chicago, Institute of Technology (Technion).

Публикации. По теме диссертации, опубликовано более 40 печатных работ, в том числе 27 в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ для публикаций результатов докторских диссертаций.

Личный вклад автора заключается в постановке и проведении экспериментов, разработке и изготовлении экспериментальных установок, разработке алгоритмов и компьютерных программ для сбора и обработки экспериментальных данных, анализе и интерпретации результатов эксперимента, непосредственном участии в развитии теоретических моделей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из аннотации, введения, семи глав, списка основных результатов и выводов работы, списка литературы. Содержание диссертации изложено на 319 страницах, включает 129 иллюстраций, 7 таблиц, и список литературы из 372 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

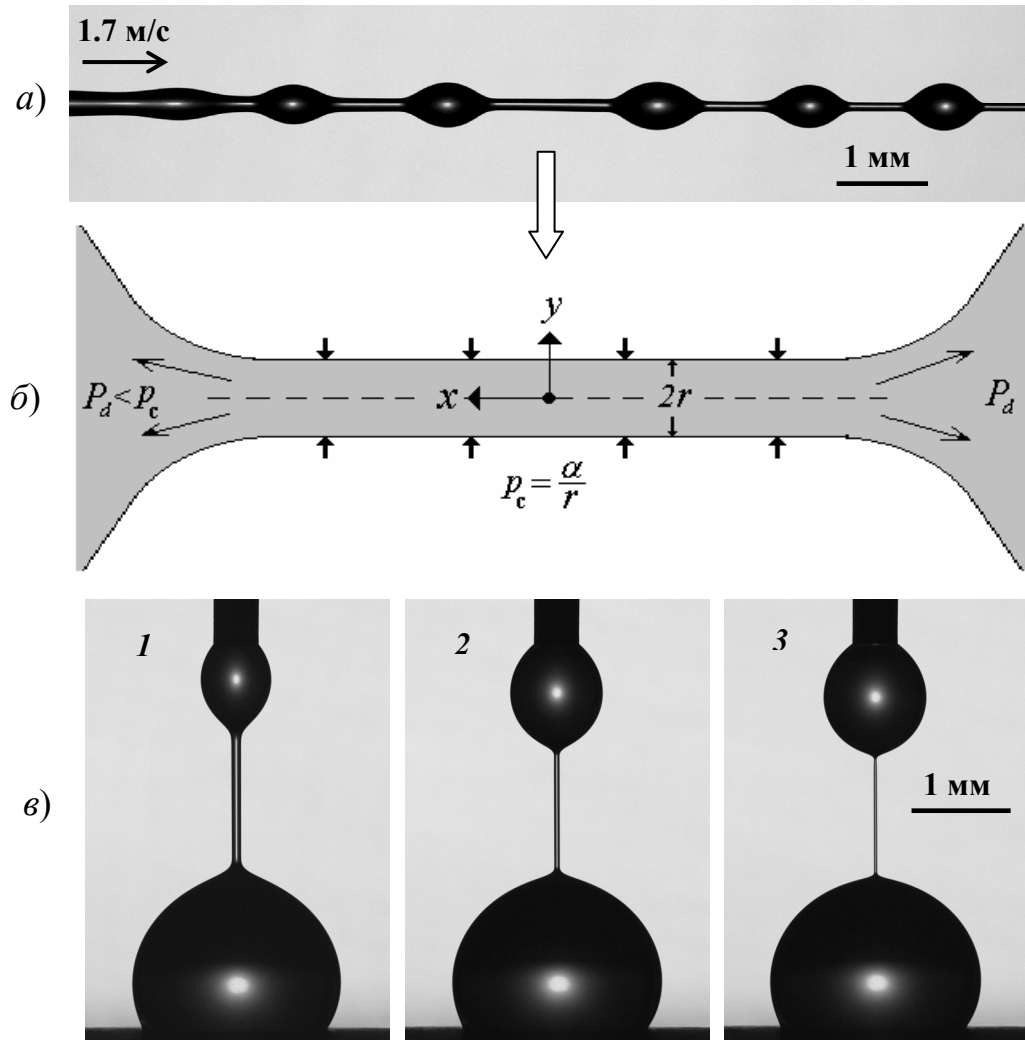
Во **введении** диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследования, а также приведено краткое содержание работы по главам.

Первая глава – обзор литературы по рассматриваемой теме, в котором наряду с обсуждением результатов, полученных другими исследователями, приводятся результаты соискателя.

Основное внимание уделяется характерному для полимерных жидкостей гидродинамическому эффекту – образованию на поздней стадии распада струи или одиночного жидкого мостика устойчивых цилиндрических нитей (фиг. 1). Общепринята следующая модель процесса. Под действием капиллярного давления в нити жидкость из нее перетекает в примыкающие капли, где давление значительно меньше (фиг. 1, б). Диаметр нити уменьшается, а жидкость в ней подвергается деформации одноосного растяжения. Если для упрощения выкладок принять, что процесс происходит при нулевом давлении окружающей среды (для несжимаемой жидкости давление окружающей среды несущественно), то на боковую поверхность нити действует только капиллярное давление $p_c = \alpha/r$, которое уравновешивается внутренним напряжением в нити $\sigma_y = -\alpha/r$, где σ_y – радиальная физическая компонента тензора напряжений, r – радиус нити. Выдавливаемая из нити жидкость беспрепятственно (в первом приближении) перетекает в примыкающие капли, что позволяет предположить, что осевая компонента тензора напряжений равна нулю $\sigma_x = 0$ (точнее, небольшому капиллярному давлению в капле с обратным знаком $\sigma_x = -P_d$). Зная из эксперимента зависимость радиуса нити от времени $r(t)$, можно определить все кинематические и динамические характеристики данного деформационного процесса: осевые и радиальные компоненты тензора скоростей деформации $E_x = -2E_y = -(2/r)dr/dt$ и тензора напряжений $\sigma_x = -P_d$, $\sigma_y = -\alpha/r$. Таким образом, самоутончающаяся нить – это одновременно и «устройство» для растяжения жидкости и «датчик» возникающих при этом напряжений и деформаций. а в целом – разрывная машина для жидкостей.

На этих принципах основаны известные приборы для исследования реологии жидкости при растяжении, использующие в качестве основного элемента самоутончающуюся капиллярную нить. Однако, ключевое предположение метода, $\sigma_x = -P_d$, не было подвергнуто экспериментальной проверке. Теоретические оценки показывают возможность существенного отклонения от соотношения $\sigma_x = -P_d$. Поэтому актуальна задача прямого измерения напряжений, действующих в нити. Решению этой задачи, наряду с исследованием других гидродинамических аспектов капиллярного распада струй, посвящены главы 2–4 диссертации. Развита гидродинамические методы измерения сил – используя специальную постановку эксперимента и уравнения баланса импульса, информация о действующих силах и напряжениях извлекалась из наблюдений за движением или формой самого исследуемого

объекта. В главах 5 и 6 полученные данные о динамике нити использованы для изучения реологического поведения полимерных растворов и суспензий при одноосном растяжении. В последней главе диссертации накопленные знания о динамике распада полимерных струй применены для реализации новых способов получения композитных микро/нановолокон и углеродных трубок. Ниже содержание глав диссертации излагается более подробно.

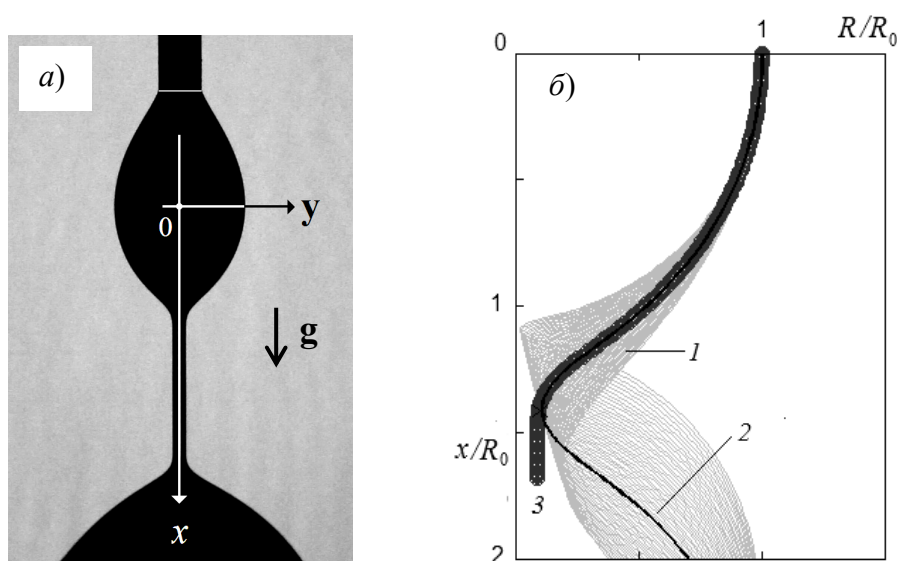


Фиг. 1. Распад струи 0.01% раствора полиэтиленоксида (ПЭО); струя движется слева направо (а). Модель нити (б). Последовательные кадры (1–3) утончения нити, примыкающей к висячей капле (в); ПЭО-1%; интервал времени между кадрами 0.125 с

Предмет исследования **второй главы** – капиллярный распад струй и одиночных мостиков полимерных растворов. Главной задачей этой части работы являлось разработка метода измерения динамических характеристик струи и получение с его помощью информации о действующих в нитях струи и одиночной нити силах и напряжениях.

В главе описан метод определения величины осевого напряжения в нити σ_x путем измерения силы натяжения нити $F=2\pi r\alpha+\sigma_x\pi r^2$, α – коэффициент поверхностного натяжения. Метод основывается на том, что аксиальные силы, действующие на каплю со стороны нитей, вызывают деформацию капли и

отклонение ее формы от равновесной, имеющей место в отсутствии нити. Анализ формы капли позволяет определить силу натяжения нити.



Фиг.2. Висячая капля с примыкающей нитью (а). Пример обработки изображения капли (б): 1 – теоретические профили капли для различных значений K , 2 – наилучший вариант ($K=1.785$) для измеренного профиля капли 3

Построен следующий алгоритм определения силы F . Рассматривается капля, находящаяся в равновесии под действием капиллярных и гравитационных сил и некоторой внешней растягивающей силы F , направленной по оси симметрии капли (фиг. 2, а). При заданном значении числа Бонда $Bo=R_0^2\rho g/\alpha$ численно решается дифференциальное уравнение для равновесной формы капли при различных значениях безразмерного параметра $K=P_0R_0/\alpha$, где ρ – плотность, g – ускорение свободного падения, R_0 и P_0 – соответственно максимальный радиус капли и капиллярное давление в точке максимального радиуса ($x=0$). Находится значение K_* , соответствующее теоретическому профилю наиболее приближенному экспериментальному профилю капли (фиг. 2, б). Сила натяжения нити вычисляется из соотношения

$$F(x) = 2\pi\alpha R_0(1 - 0.5K_*) - \rho g \pi \int_0^x R^2(x) dx$$

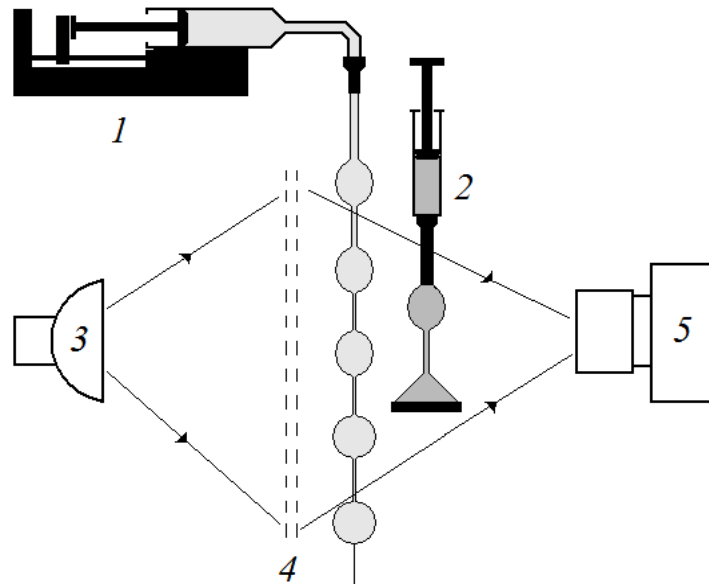
Для вертикально движущихся струй гравитационное искажение формы капли отсутствует, и поэтому полагалось $Bo=0$.

Проанализированы возможные эффекты влияния на форму капли инерции и вязкости жидкости, а также движения втекающей в каплю жидкости. Показано, что эти эффекты малы.

Эксперименты проводились с водными растворами полиэтиленоксида (ПЭО, средняя молекулярная масса $M=4$ млн.) и полиакриламида (ПАА, $M=11$ млн.) в диапазоне концентраций 0.003–1% при температуре окружающей среды $25\pm 1^\circ\text{C}$. Входящий в расчеты коэффициент поверхностного натяжения α измерен методом висячей капли.

Проведены две серии экспериментов (фиг. 3). В первом случае исследовались нити, формируемые в результате капиллярного распада

вертикальной струи, вытекающей из капилляров диаметром 0.25 и 0.34 мм. Подача жидкости осуществлялась шприцевым насосом, обеспечивающим постоянный объемный расход жидкости. Скорость истечения струи составляла соответственно 1.69 и 1.84 м/с. Число Рейнольдса, оцененное по минимальной сдвиговой вязкости растворов, составляло $Re \sim 100$. В струйных экспериментах исследовались растворы концентраций 0.003–0.03%.



Фиг. 3. Схема эксперимента: 1 – шприцевой насос, 2 – шприц, 3 – импульсная лампа, 4 – конденсор (линза Френеля), 5 – фотокамера

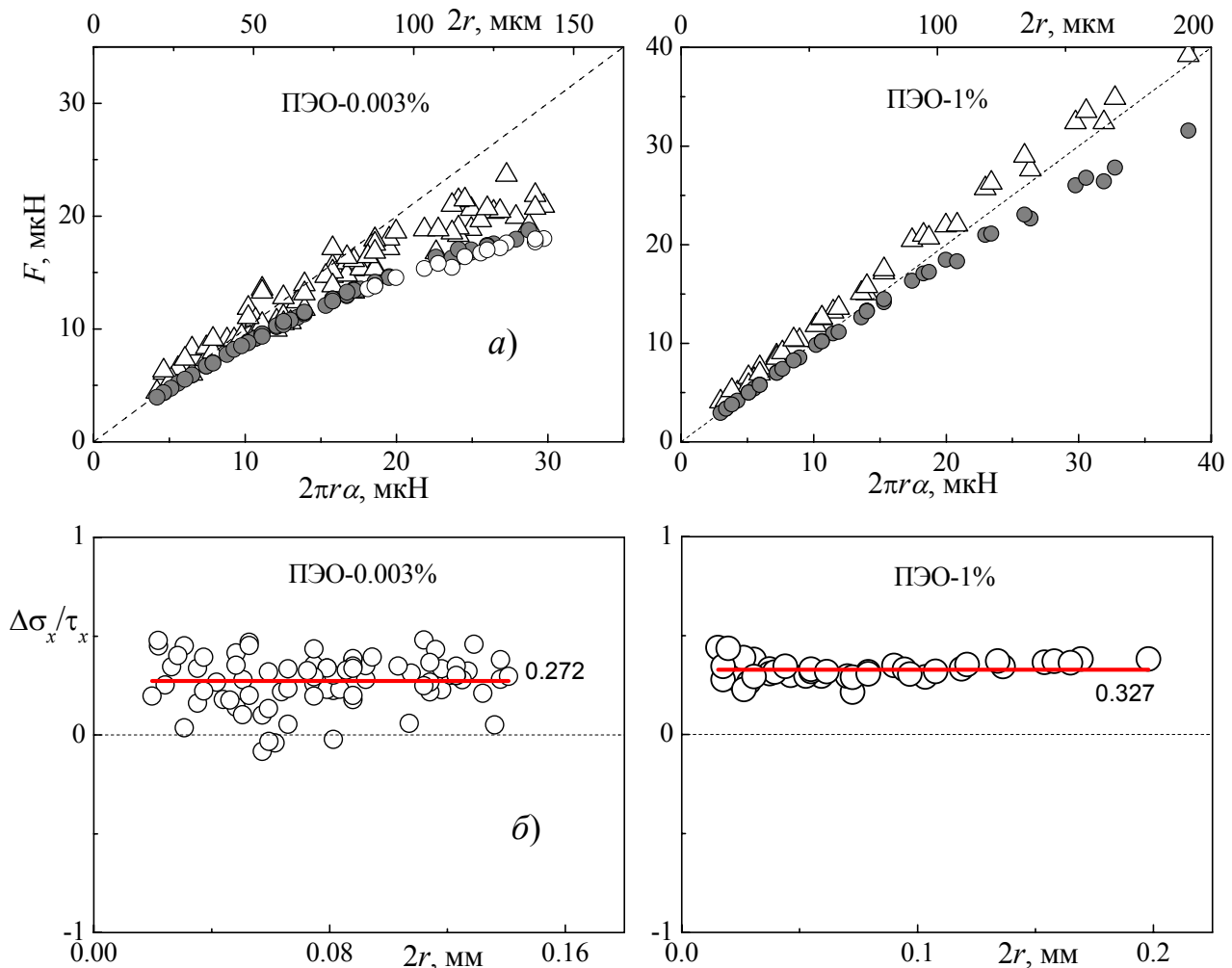
В другом варианте эксперимента, предпочтительного для концентрированных (0.1–1%) полимерных растворов, формировалась одиночная нить, примыкающая к висячей капле (фиг. 1, в). Для этого капля исследуемой жидкости при помощи 1-мл шприца вручную выдавливалась через стальную иглу (фиг.3).

Процесс распада струи и одиночного мостика регистрировался с помощью цифровой фотокамеры Canon 7D при импульсном освещении длительностью 3мкс.

Анализ фотографий капель проводился при помощи программы обработки изображений, разработанной на базе пакета MatLab, и включал в себя выделение границ капли, измерение ее формы и вычисление силы натяжения нити. Пример обработки изображения висячей капли 1%-го водного раствора ПЭО показан на фиг. 2, б. Разработанный метод позволил измерить силы натяжения нитей величиной несколько микроныютонов с точностью порядка 1–3%. Примеры полученных результатов измерения силы натяжения нитей в струе и одиночном мостике приведены на фиг. 4, а.

Данные измерения силы натяжения нитей позволили определить осевое напряжение $\sigma_x = (F - 2\pi r \alpha) / \pi r^2$ и краевой эффект перетекания жидкости из нити в каплю $\Delta\sigma_x = \sigma_x + P_d$ (фиг. 4, б), который показывает величину отклонения реального напряжения от гипотетического значения $\sigma_x = -P_d$. Если $\Delta\sigma_x > 0$, то дополнительное напряжение способствует перетеканию жидкости из нити в

каплю, в противном случае оно препятствует втеканию в каплю. При отсутствии эффектов перетекания $\Delta\sigma_x=0$. На фиг. 4, б $\Delta\sigma_x$ представлен зависимостью $\Delta\sigma_x/\tau_x$ ($\tau_x=\sigma_x+p_c$ – осевая компонента тензора избыточных напряжений) от диаметра нити. Видно, что краевой эффект для всех исследуемых жидкостей (концентрация 0.003–1%) имеет место, а его величина в первом приближении не зависит от диаметра нити, типа и концентрации полимера в растворе. Средние значения $\Delta\sigma_x/\tau_x$ и стандартные отклонения (в скобках) для растворов ПЭО-1%, ПАА-0.1% и ПАА-0.3% составляют 0.327 (0.047), 0.266 (0.048), 0.341(0.053). Средняя величина $\Delta\sigma_x/\tau_x$ по результатам всех измерений равна 0.311. Отсюда для осевой компоненты тензора избыточных напряжений получено $\tau_x=1.45(\alpha/r-P_d)$, а для растворов концентрации 0.003–0.03%: $\Delta\sigma_x/\tau_x=0.198$, $\tau_x=1.25(\alpha/r-P_d)$. Таким образом, при изменении концентрации полимера на несколько порядков величина краевого эффекта возрастает не более чем на 50%. Ранее предполагалось, что $\tau_x=\alpha/r-P_d$.



Фиг. 4. Зависимость силы натяжения F от $2\pi r\alpha$ (а): сплошные символы – ожидаемый результат при отсутствии краевого эффекта перетекания для капель различных диаметров. Зависимость $\Delta\sigma_x/\tau_x$ от диаметра нити (б): сплошная горизонтальная линия – аппроксимация постоянным значением, значение параметра аппроксимации приведено на графиках. Графики получены объединением результатов обработки различных капель на мгновенных фотографиях распада струи и одиночных мостиков

Для анализа экспериментальных данных процесс перетекания жидкости из нити в каплю рассмотрен теоретически. Показано, что величина краевого эффекта определяется интегралом

$$\Delta\sigma_x/\tau_x = 2 \int_1^{\infty} (e^{A(1-\xi^3)}/\xi^5) d\xi$$

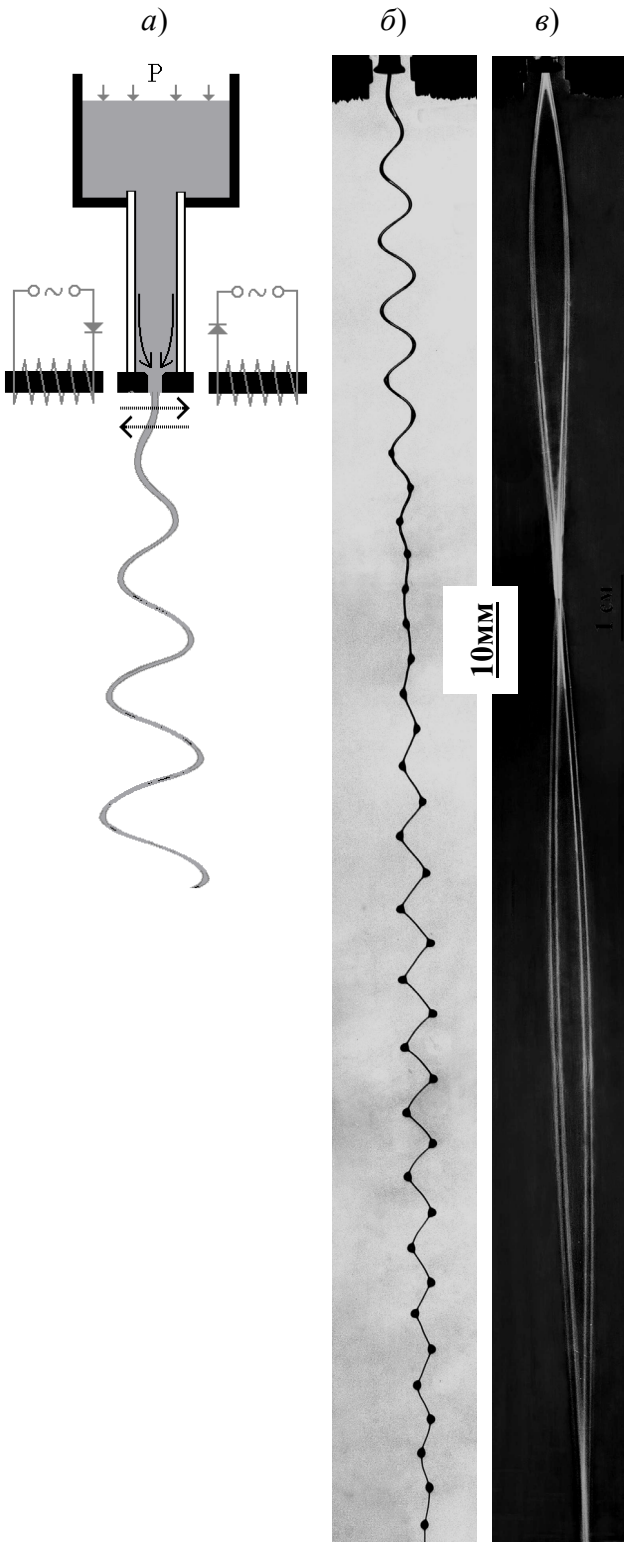
где $A = \psi_0^{-1}(\theta/\theta_1) \times (r/L) \rightarrow 0$, θ_1 – время релаксации напряжений в макрообъеме (капле), θ – время релаксации при растяжении в нити, ψ_0 – половина угла конуса радиального течения в капле, L – длина нити.

Проведены вычисления $\Delta\sigma_x/\tau_x$ при различных значениях параметров r/L и A . В результате сравнения расчетных и экспериментальных величин $\Delta\sigma_x/\tau_x$, делается вывод о том, что время релаксации напряжений при сжимающем течении в капле во много раз меньше времени релаксации при растяжении в нити (для нитей струи $\theta/\theta_1 = 15.5-155$, а в случае нити, примыкающей к висючей капле, - $\theta/\theta_1 = 5-50$). Это указывает на неизвестные ранее особенности реологического поведения полимерных растворов в элонгационных течениях.

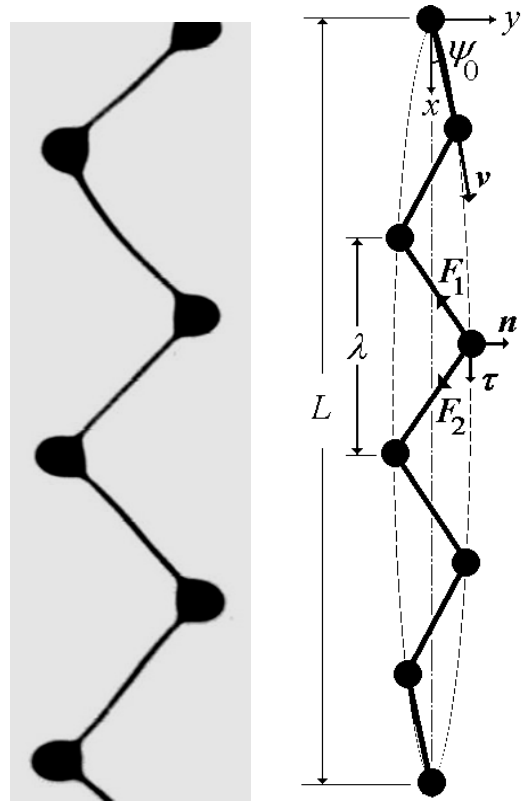
Кроме измерения напряжений в нити в данной главе проведен анализ инерционных эффектов, наблюдаемых при распаде струи и одиночного мостика. Показана высокая «чувствительность» формы нити к действию сил инерции, которая выражается в появлении на краях нити локальных сужений и одиночных возмущений в виде капли. Предположено, что эти возмущения блокируют отток жидкости из нити и тем самым замедляют утончение центральной части нити, а, следовательно, и растяжение жидкости. Это приводит к уменьшению стабилизирующего действия упругих напряжений и ведет к быстрому распаду нити по механизму Рэлея.

Третья глава посвящена необычному варианту течения жидкости – непрерывной зигзагообразной струе. Такая струя получена на заключительной стадии распада струи полимерного раствора, вытекающей из колеблющегося в поперечном направлении сопла – фиг. 6. Под действием колебаний первоначально однородная струя подвергается изгибным деформациям и по ней распространяется поперечная волна. При распаде такой изгибной струи гребни волн трансформируются в капли, а мостики между ними – в однородные утончающиеся нити, которые не позволяют каплям разлетаться в разные стороны и вынуждают их двигаться по криволинейным траекториям. Одновременно с необычностью формы зигзагообразная струя является источником деформирования жидкости, так как утончение нити между каплями такой струи, как и в случае прямолинейной струи, – есть одноосное растяжение жидкости. Возникающие при деформации внутренние напряжения влияют на движение всей структуры и поэтому могут быть оценены путем анализа формы струи.

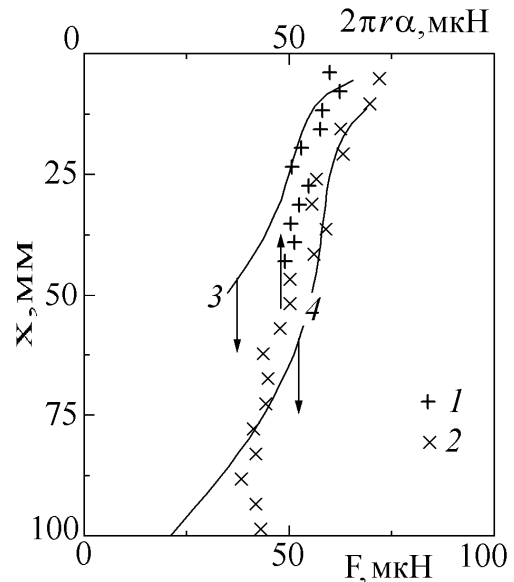
Для типичных условий истечения струи числа Фруда $Fr = v^2/gL \sim 100$ и Вебера $We = \rho v^2 r / \alpha \sim 100$ достаточно велики, поэтому влиянием гравитационных и капиллярных сил на изменение модуля скорости v можно пренебречь. Хотя число Рейнольдса $Re \sim 1000$ велико, течение имело ламинарный характер.



Фиг. 6. Схема формирования колеблющейся струи (а), фотографии поперечной волны на струе (б, в)



Фиг.7. Увеличенный фрагмент фотографии зигзагообразной струи и ее модель



Фиг. 8. Величины $2\pi r\alpha$ (1, 2) и натяжения F (3, 4) в нитях двух зигзагообразных струй при $v=6.27$ и 8.33 м/с

Предложена модель зигзагообразной струи (фиг. 7), в которой каждая капля рассматривается как тело переменной массы, движущееся по криволинейной траектории под действием сил натяжения двух примыкающих нитей. Получено динамическое уравнение, описывающее траекторию движения $y(x)$ капли в

струе, в котором учитываются как изменение массы капли в результате перетекания жидкости из нитей, так и реактивная сила из-за импульса втекающей жидкости

$$\frac{mv^2\lambda}{8} \left(1 + \left(\frac{4y}{\lambda} \right)^2 \right)^{1/2} \frac{d^2y}{dx^2} + (F - \rho u^2 \pi r^2) y = 0,$$

$$m(t) = \rho \frac{\pi \lambda}{2} \left(r_0^2 - r^2 \left(1 + \left(\frac{4y}{\lambda} \right)^2 \right)^{1/2} \right) \quad (1)$$

Здесь $m=m(t)$ – масса капли, v – скорость капли, t – время, F – сила натяжения нити, λ – длина волны, ρ – плотность жидкости, r_0 – начальный радиус струи, r – текущий радиус нити, u – скорость перетекания жидкости из нити в каплю в системе отсчета, связанной с каплей.

Эксперименты проводились с водными растворами ПЭО ($M=4$ млн.) концентрации 0.01%. Под действием давления сжатого воздуха (P) струя вытекала вертикально вниз со скоростью $v=5-10$ м/с через стальное сопло с внутренним диаметром 0.5 мм и длиной 1.5 мм. Сопло закреплялось на конце упругой пластмассовой трубки внутренним диаметром 2.5 мм. Вся конструкция помещалась в зазор между полюсами электромагнитов (фиг.6, а). Подавая на электромагниты электрическое напряжение частотой 500–1500 Гц, удавалось вызывать поперечные колебания выходного сопла, которые передавались струе и распространялись вдоль ее длины. Система фоторегистрации распада струи включала три вида освещения: стробоскопическое для визуального наблюдения и контроля; одиночную импульсную подсветку длительностью не более 3 мкс для фотографирования мгновенной формы струи (фиг.6, б); непрерывное освещение, позволившее при времени экспозиции $\sim 1/30$ с зафиксировать непрерывную траекторию полета капли (фиг. 6, в).

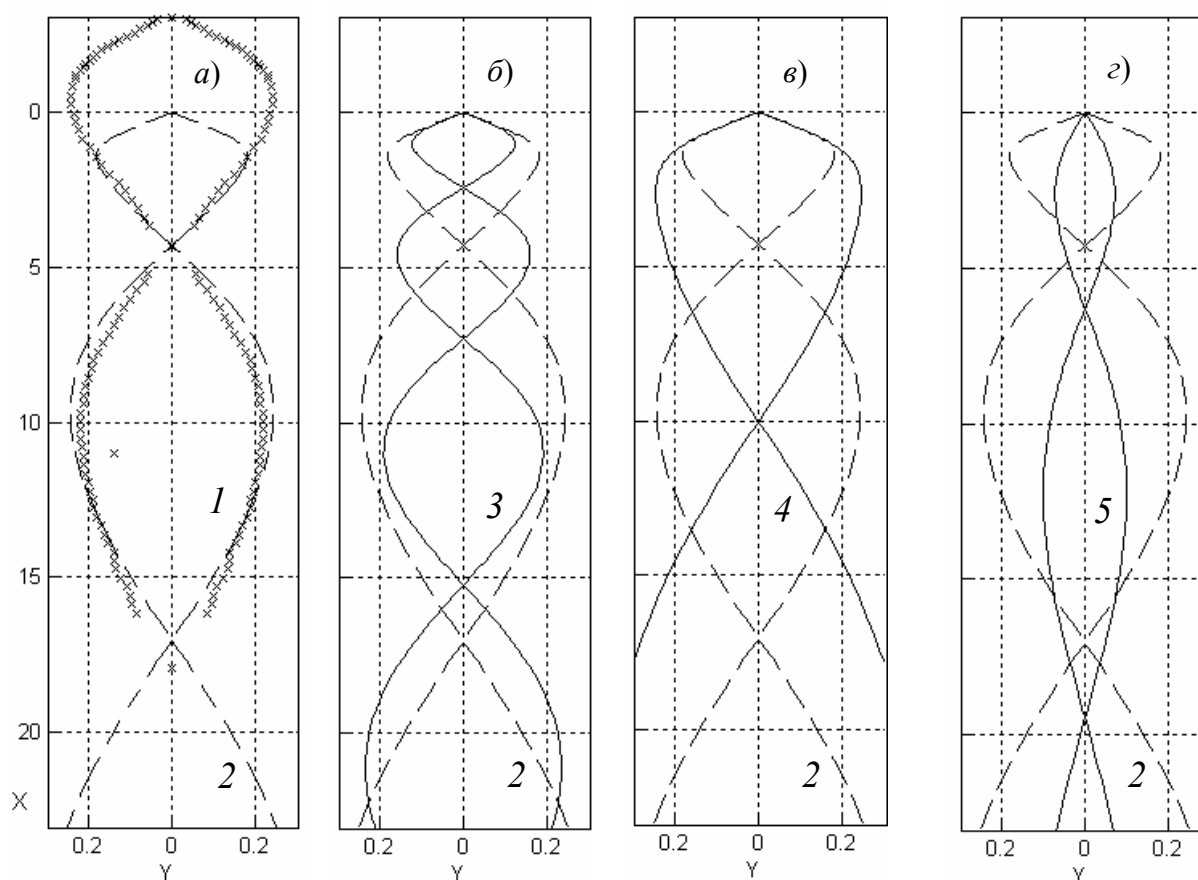
С помощью уравнения (1) и компьютерной обработки траекторий полета капель определена сила натяжения нитей зигзагообразной струи (фиг. 8). Установлено, что в пределах точности измерений ($\sim 10\%$), сила натяжения нити F равна капиллярному натяжению ее поверхности $2\pi r\alpha$.

Таким образом, зигзагообразная струя представляет собой струйный элонгационный реометр, т.е. может быть использована в качестве разрывной машины, поскольку позволяет одноосно растягивать жидкие материалы и измерять все кинематические и динамические величины – временные зависимости деформации, скорости деформации, напряжений.

Используя уравнения (1) и найденную закономерность $F \approx 2\pi r\alpha$, а, также предполагая экспоненциальный характер утончения нити в струе, построен алгоритм численного расчета профилей зигзагообразных струй. В расчетах использовались следующие безразмерные определяющие параметры: $We = \rho v^2 r_0 / \alpha$, $De = \theta v / \lambda$ – числа Вебера и Деборы, θ – время релаксации напряжений, ψ_0 – начальный угол разлета струи.

На фиг. 9, а–г представлены примеры вычисленных профилей струи для ряда значений безразмерных параметров, а также сопоставление расчетных и экспериментальных данных (фиг. 9, а). Сопоставление данных представлено

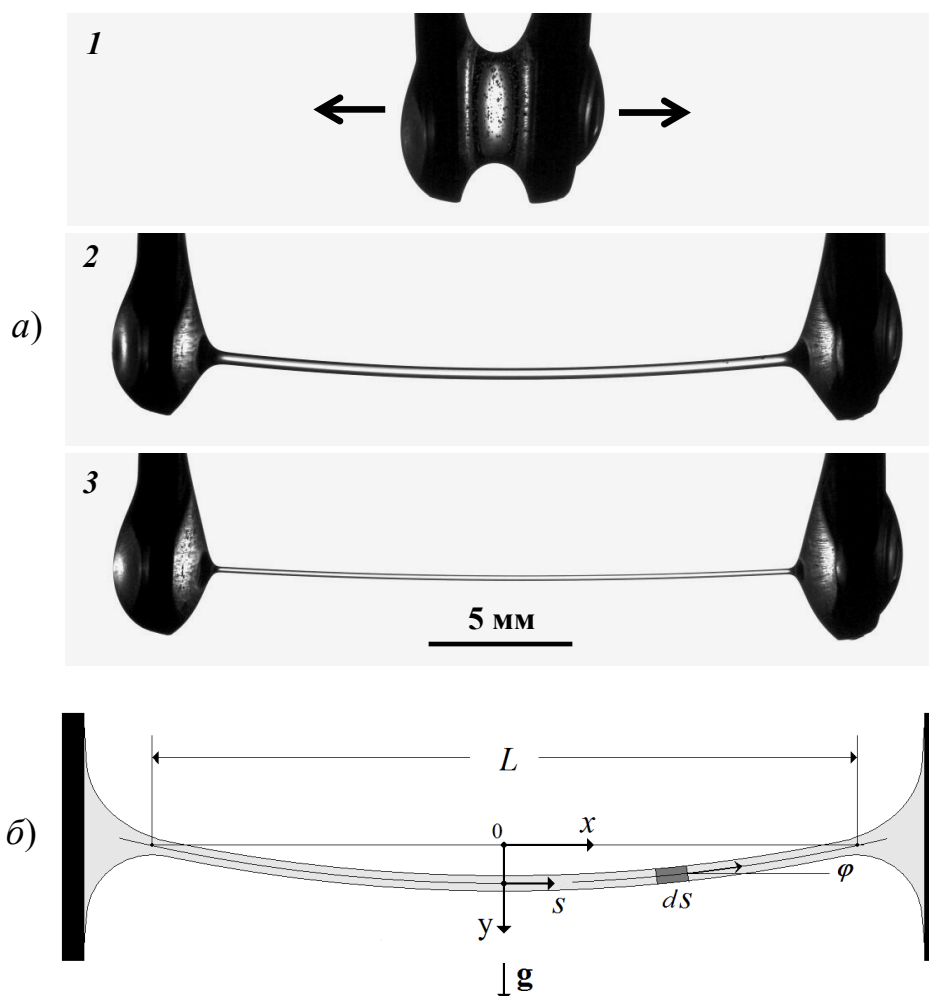
совмещением узлов между первым и вторым волновыми пакетами, так как рассмотренный выше механизм реально управляет движением распадающейся струи начиная со второго волнового пакета, в то время как первый волновой пакет описывается уравнениями «гладкой» изгибающей струи. Результаты показывают, что во всех случаях ($a-z$) размеры волновых пакетов, т.е. их длина и амплитуда, увеличиваются по мере удаления от капилляра. Для конкретного волнового пакета оба этих размера увеличиваются с ростом числа Вебера (b) и падением числа Деборы (v). Амплитуды волновых пакетов растут с увеличением угла разлета струи ψ_0 , в то время как влияние этого угла на соответствующие длины волновых пакетов незначительно (z).



Фиг.9. Профили огибающих волн зигзагообразной струи. Точки 1 – измеренный профиль реальной струи, представленной на фиг. 6, б и в. Кривые 2 – рассчитанный профиль этой струи, для которой $(We, De, \text{tg}\psi_0)=(256, 4.81, 0.2)$. Профили 3 – 5 отвечают наборам параметров $(We, De, \text{tg}\psi_0)=(100, 4.81, 0.2), (256, 3.00, 0.2), (256, 4.81, 0.05)$

Таким образом, показано, что, изменяя режим истечения и реологические параметры (θ) полимерной жидкости (которые определяются молекулярной массой и концентрацией полимера в растворе), можно получать различные формы распада зигзагообразной струи. Например, осуществить постоянный рост амплитуды поперечной волны (4 на фиг. 9), что можно рассматривать как новый способ распыливания полимерной жидкости. При таком распылении обеспечивается большая удельная свободная поверхность жидкости, что является определяющим фактором для многих приложений.

Четвертая глава посвящена исследованию другого варианта жидкого мостика – горизонтальной нити упруговязкой жидкости. Такие нити формируются, когда растяжение капли происходит в горизонтальном направлении перпендикулярно направлению силы тяжести. Кадры видеозаписи этого процесса показаны на фиг. 10, *a*. Видно, что после остановки пластин образуется нить с искривленной осью, а в дальнейшем по мере утончения, величина прогиба оси нити уменьшается.



Фиг. 10. Последовательные фотографии (1–3) процесса формирования и утончения горизонтальной нити раствора ПЭО-1% (а): интервал времени между кадрами 0.125 с. Модель нити (б)

Преимущество такой постановки эксперимента состоит в том, что информация о напряженном состоянии жидкости в нити содержится в изогнутой под действием гравитации оси нити.

Теоретический анализ течения данного типа показывает, что в случае достаточно медленно утончающихся нитей, силу натяжения F и осевую компоненту σ_s тензора напряжений в нити можно определить, регистрируя в эксперименте форму оси $y(x)$:

$$F(s) = -\rho g \pi r^2 \frac{1 + y'^2}{y''}, \quad \sigma_s = -\rho g \frac{1 + y'^2}{y''} - \frac{2\alpha}{r}$$

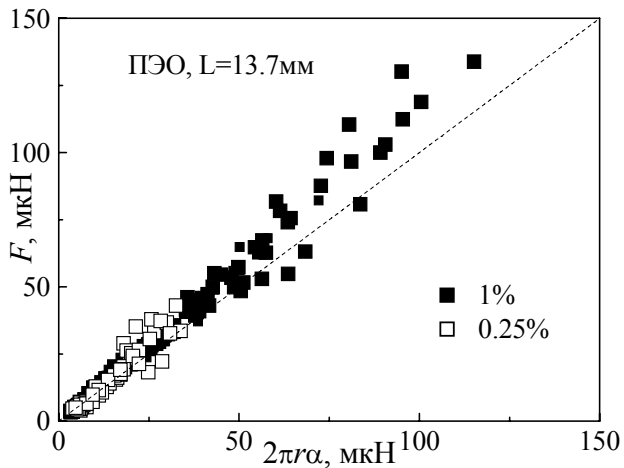
Эксперименты проводились с водными растворами ПЭО ($M=4$ млн.) концентраций 0.25 и 1%, и растворами ПАА ($M=11$ млн.) концентраций 0.1, 0.25, 1%. Также изучались 0.001%-ные растворы ПАА в чистом глицерине вязкостью $\eta=1.18$ Па·с и в глицерине с небольшой добавкой воды ($\eta=0.46$ Па·с). Сдвиговая вязкость исследуемых жидкостей измерена на ротационном вискозиметре НААКЕ RV-1, а коэффициент поверхностного натяжения определен методом висючей капли.

В качестве устройства для формирования горизонтальной нити применен закрепленный на штативе пинцет, сведенные лапки которого кратковременно погружались в емкость с полимерным раствором, вынимались, и затем «отпускались». В результате формировалась горизонтальная нить, форма которой снималась на цифровую фотокамеру Canon 7D. Использовались режим съемки с частотой 8 кадр/с и синхронизированное с затвором фотоаппарата импульсное освещение в проходящем свете. Для детализации процесса эволюции нити во времени помимо фотосъемки высокого разрешения проводилась скоростная видеосъемка камерой Optronis CR3000x2 с частотой 500÷1000 кадр/с.

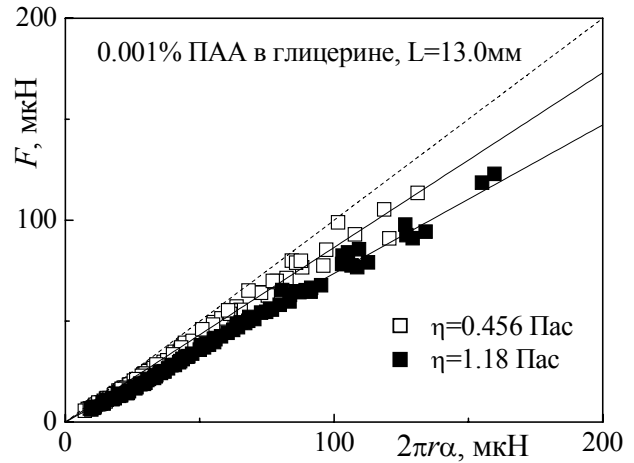
Анализ формы нити и вычисление силы натяжения осуществлялись с помощью разработанной программы обработки изображений. Алгоритм включал в себя выделение границ нити, определение ее диаметра и формы оси. При вычислениях полученная из эксперимента табличная зависимость $y_i(x_i)$ аппроксимировалась параболой $y=A_2x^2+A_1x+A_0$.

Примеры результатов измерений силы натяжения и осевого напряжения нити приведены на фиг. 11–14. Представленные графики получены в результате объединения данных нескольких серий опытов. Как и в случае вертикальных струй и одиночных жидких мостиков (глава 2), обнаружен краевой эффект взаимодействия нити с концевой каплей (представлен отношением осевого напряжения σ_z к капиллярному давлению в нити $p_c=\alpha/r$). Для нитей полимерных растворов в маловязком растворителе (воде) наблюдается эффект упругого подтягивания нити (фиг. 11, 13), в то время как для растворов полимеров в высоковязком растворителе (глицерине) имеет место торможение жидкости при ее втекании в каплю, что приводит к отрицательному значению напряжения (фиг. 12, 14). Отмечается, что эти обстоятельства должны учитываться при тестировании полимерных жидкостей методом распадающегося мостика, например, введением поправочного коэффициента к величине осевого напряжения в нити (глава 2).

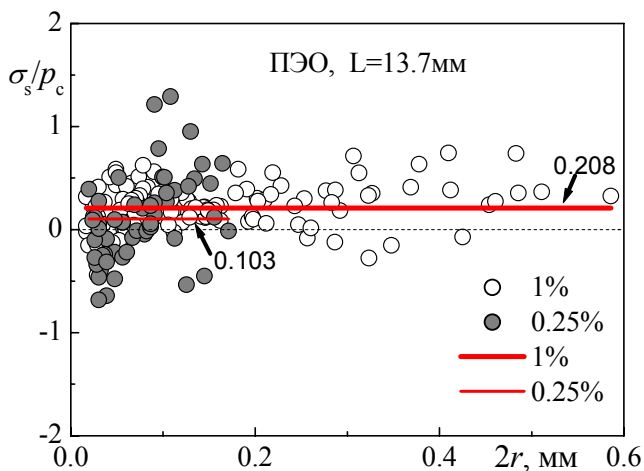
Предложено использовать эксперимент с горизонтальной нитью в качестве модификации стандартного метода утончающейся нити (глава 1), так как в этом случае напряжения в жидкости определяются по форме оси и диаметру нити без каких-либо предположений о характере ее взаимодействия с примыкающими каплями.



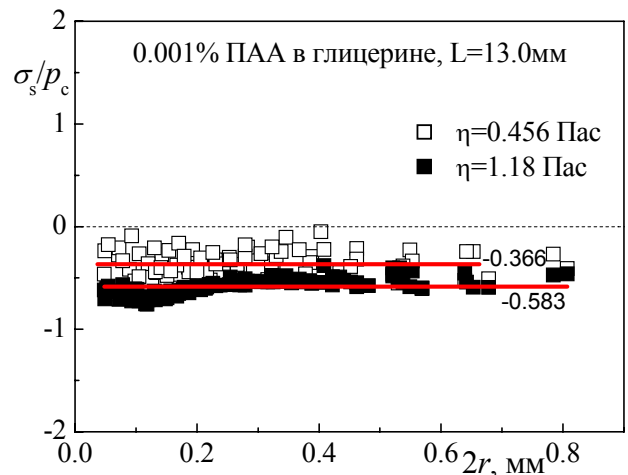
Фиг. 11. Зависимость натяжения нити F от $2\pi r\alpha$ для растворов ПЭО различных концентраций



Фиг. 12. Зависимость F от $2\pi r\alpha$ для 0.001%-ных растворов ПАА в глицерине различной вязкости



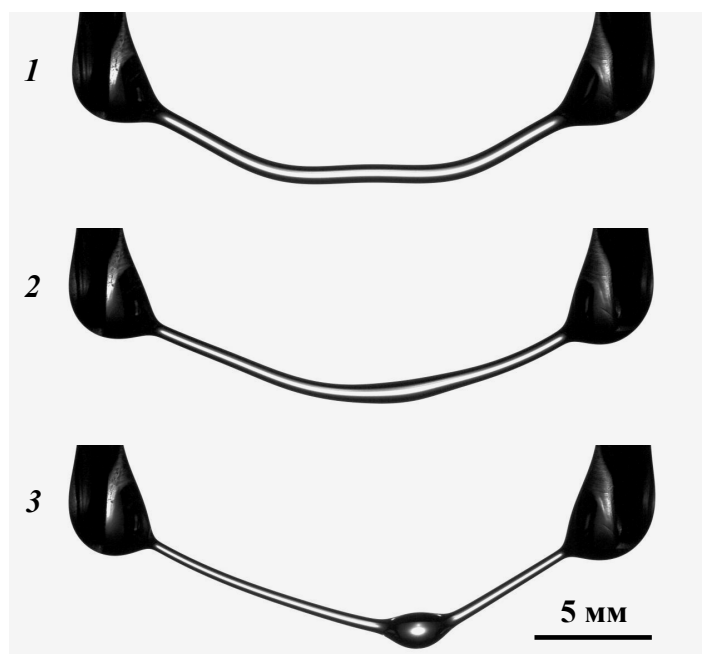
Фиг. 13. Зависимость σ_s/p_c от диаметра нити для растворов ПЭО различных концентраций; сплошные линии – аппроксимация постоянным значением; значение параметра аппроксимации приведено на графике



Фиг. 14. Зависимость σ_s/p_c от диаметра нити 0.001%-го раствора ПАА в глицерине различной вязкости при фиксированной длине нити; сплошные линии – аппроксимация постоянным значением

С помощью скоростной видеосъемки обнаружено, что в процессе утончения горизонтальные нити могут испытывать периодические поперечные колебания оси. В зависимости от условий эксперимента возможны различные режимы колебаний нити: вынужденные, собственные и резонансные. Анализ процесса показал, что все режимы колебаний адекватно описываются простыми соотношениями, полученными из формулы для частоты главной моды колебаний струны.

Эксперименты с растворами ПАА в глицерине и воде показали, что не удается сформировать длинные ($L > 25$ мм) устойчивые горизонтальные нити диаметром более 1 мм. Возможный характер развивающейся при этом неустойчивости показан на фиг. 15. Предложен простой критерий неустойчивого утончения горизонтальной нити. Неустойчивость возникает, когда силы натяжения на концах нити ни при каких условиях (краевых углах наклона оси) не компенсируют вес нити: $4\pi r\alpha < \rho\pi r^2 Lg$. Отсюда следует условие неустойчивости: $Lr > 4\alpha/\rho g = 2a^2$, где $a = (2\alpha/\rho g)^{1/2}$ – капиллярная постоянная.



Фиг. 15. Развитие неустойчивости и распад горизонтальной нити 0.001% раствора ПАА в глицерине (1–3); вязкость раствора $\eta = 1.18$ Па·с; интервал времени между кадрами 0.125 с

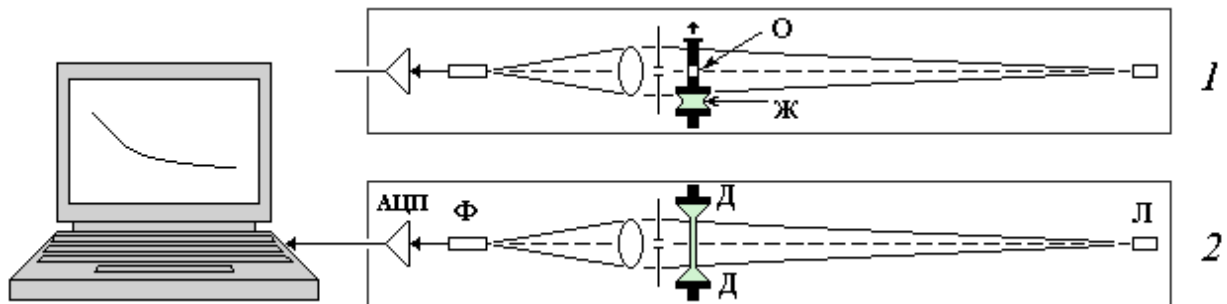
Пятая глава посвящена поиску закономерностей формирования, утончения и распада мостика (нити) полимерной жидкости, анализу физических механизмов разрушения нити, разработке методик и приборов для регистрации зависимости диаметра нити от времени, методам извлечения из этой зависимости информации о реологических свойствах жидкости.

В первой части главы описаны методы и приборы для измерения зависимости диаметра нити от времени, исследуются процессы формирования, утончения и разрыва нити полимерной жидкости.

Для проведения экспериментов разработан и изготовлен прибор *микроРЕОТЕСТЕР*, принципиальная схема которого показана на фиг. 16. Прибор регистрирует и анализирует зависимость срединного диаметра нити от времени. Диаметр нити определяется по степени перекрытия светового потока. Электрический сигнал, пропорциональный диаметру нити, оцифровывается и

передается в компьютер. Прибор позволяет детально проследить кинетику утончения нити, начиная с диаметров ~ 2 мм и кончая диаметрами порядка 3 мкм. Для прибора разработано программное обеспечение, которое дает возможность проводить в автоматическом режиме сравнение получаемой экспериментальной зависимости $2r(t)$ с теоретическими предсказаниями для жидкостей различного реологического поведения, выбор наиболее адекватной реологической модели и определение ее реологических констант. Прибор послужил прототипом элонгационного реометра CaBER1.

Кроме того, в отдельных случаях проводилась видеозапись процесса утончения нити.



Фиг. 16. Принципиальная схема прибора микроРЕОТЕСТЕР: 1 – исходное положение при сведенных дисках Д, 2 – положение после разведения дисков

Используя разработанные методы регистрации, поставлены эксперименты с целью определения полной кривой утончения нити $r(t)$ и измерения времени до ее разрыва. Исследовались водные растворы ПЭО ($M=4$ млн.) и ПАА ($M=11$ млн.) концентраций 0.001–10%.

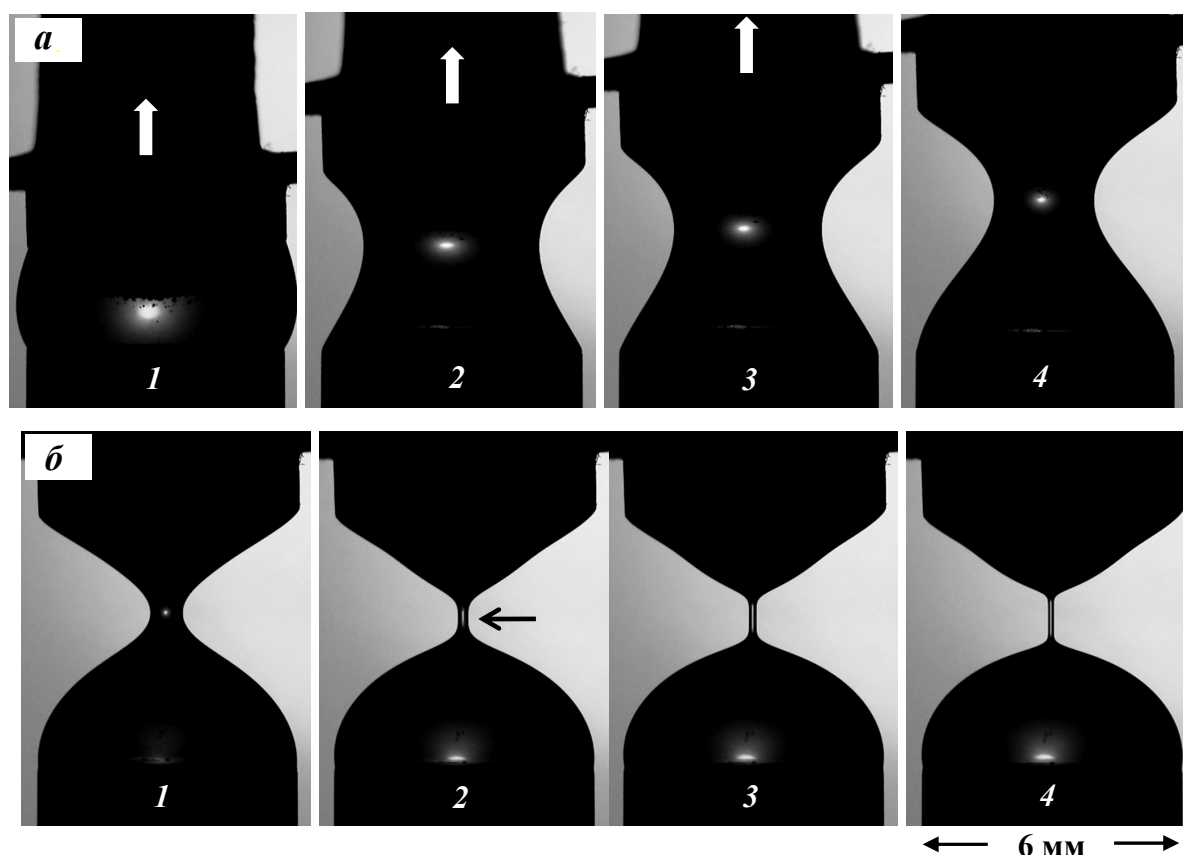
Установлено, что утончение нити в достаточно широком диапазоне диаметров описывается экспоненциальным законом, который может быть теоретически предсказан на основе модели упругих гантелей Куна, феноменологическим аналогом которой являются модель Максвелла с верхней конвективной производной и модель Олдройда-Б

$$r=r_0 \exp(-t/3\theta)$$

где r и r_0 – текущий и начальный радиусы нити, t – время, θ – время релаксации жидкости.

Для того чтобы исследовать влияние условий формирования нити на процесс ее последующего самораспада, растяжение капли при формировании нити осуществлялось двумя способами – быстро и медленно. В первом случае время растяжения капли значительно меньше общего времени распада нити, второй способ отвечал ситуации, когда в результате медленного растяжения капли формировался жидкий мостик, который при определенном сочетании

геометрических размеров терял устойчивость, превращаясь в утончающуюся нить (фиг. 17).



Фиг. 17. Формирование жидкого мостика раствора ПЭО-1% (1–4) при медленном растяжении капли между двумя дисками (а) и его последующий самораспад (1–4) с образованием цилиндрической нити (б). Интервал времени между кадрами на (а) равен 1.6 с; (б) – 0.066 с. Стрелка на кадре 2 (б) показывает начало экспоненциальной стадии утончения нити

Получены зависимости диаметра нити $2r_b$, соответствующего минимальному диаметру жидкого мостика в момент потери устойчивости при медленном растяжении капли, диаметра $2r_0$, отвечающего началу экспоненциальной стадии утончения, диаметра $2r_1$, соответствующего окончанию экспоненциальной стадии и переходу к интенсивному распаду нити от концентрации. Результаты для растворов ПЭО показаны на фиг. 18. Диаметры $2r_0$, $2r_1$ и $2r_b$ слабо зависят от концентрации полимера, а также от скорости формирования нити при концентрациях ниже 1%.

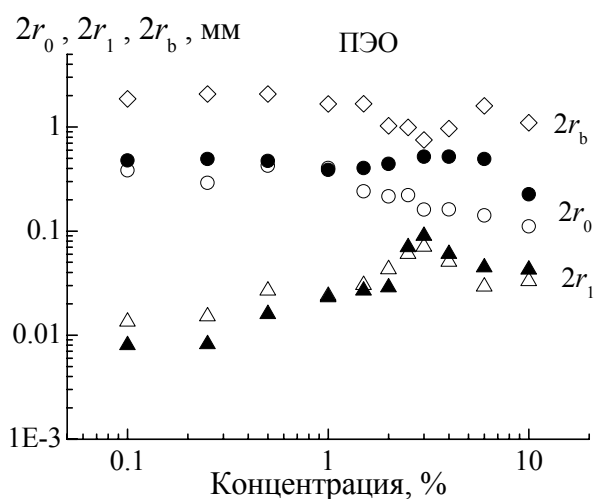
Теоретический анализ процесса распада мостика и формирования нити показал, что быстрый (по сравнению с временем релаксации θ) переход к началу равновесной (экспоненциальной) стадии утончения нити определяется модулем упругости полимерного раствора $r_0 = (Gr_b^4/\alpha)^{1/3}$, где G – модуль упругости в рамках реологической модели Одройда-Б. Это позволяет определить модуль упругости полимерной жидкости при помощи эксперимента с мостиком.

На фиг. 19 представлен пример результатов измерения времени релаксации θ и отношения времени до разрыва t_1 ко времени релаксации, $S = t_1/\theta$

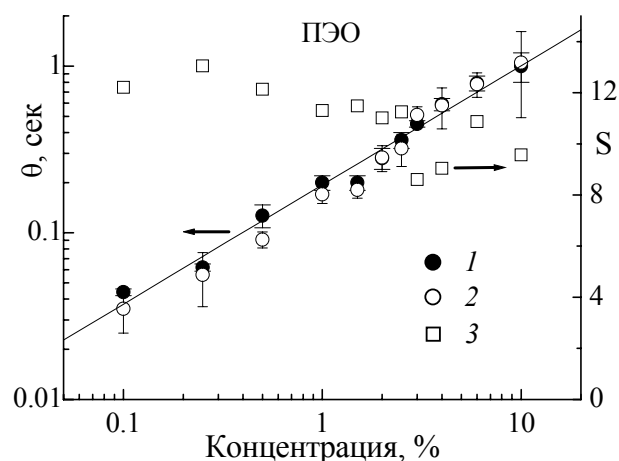
(коэффициент распада). Зависимость времени релаксации от концентрации c описывается степенной функцией $\theta \propto c^n$, причем между случаями быстрого и медленного растяжения нет заметной разницы. Для ПАА $n=0.83 \pm 0.02$, а для ПЭО $n=0.71 \pm 0.03$. Параметр S слабо зависит от концентрации полимера.

Полученные данные указывают на корреляцию между временем релаксации жидкости и временем до разрыва нити. Хотя при переходе от одного раствора к другому, времена жизни нити и релаксации изменялись на порядки, отношение этих величин с достаточной степенью точности оставалось постоянным. Эксперименты также показали, что величины θ , t_1 , и S не зависят от объема пробы, скорости формирования нити и ее начальной длины. Для трех серий измерений, получены следующие средние в серии значения величины S и соответствующие стандартные отклонения (в скобках): 8.42 (1.13), 10.95 (1.38), 9.47 (1.20). Обнаруженная закономерность позволила предложить простой способ измерения времени релаксации путем предварительного лабораторного определения коэффициента S для данного класса полимеров (характеризуемого близостью химического строения), после чего достаточно определить каким-либо способом время жизни нити t_1 и найти соответствующее ему значение времени релаксации по формуле $\theta = t_1/S$. Данный упрощенный подход может быть положен в основу простых приборов для экспресс-контроля свойств полимерных растворов в производственных (в том числе и полевых) условиях.

С научной точки зрения основное значение имеет объяснение наблюдаемой корреляции в рамках молекулярной теории полимерных растворов. Проанализирована одна из возможных причин разрыва нити на поздних стадиях ее утончения – деструкция макромолекул под действием упругих напряжений в жидкости. Показано, что предложенная модель кинетической деструкции макромолекул полимерной жидкости не противоречит полученным экспериментальным данным.



Фиг. 18. Результаты измерения различных диаметров нити растворов ПЭО для быстрого (темные символы) и медленного разведения (светлые символы) пластин



Фиг. 19. Зависимости времени релаксации θ для быстрого (1) и медленного (2) разведения пластин и коэффициента распада S (3) от концентрации растворов ПЭО

Во второй части главы исследован случай, когда существенны оба свойства жидкости – сдвиговая вязкость и упругость. Примером такой жидкости может служить разбавленный раствор полимера в высоковязком растворителе. Предполагается, что реологическое поведение таких жидкостей описывается моделью Олдройда-Б, причем для учета возможной полидисперсности молекулярной структуры в рассмотрение вводится спектр времен релаксации. Показано, что процесс капиллярного самоутончения нити такой жидкости в безынерционном приближении описывается уравнением

$$1 + \frac{6\eta}{\alpha} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{\alpha} \frac{r_s^4}{r^3} \sum_i G_i A_{is} \exp\left(-\frac{t-t_s}{\theta_i}\right) \quad (2)$$

Здесь η – сдвиговая вязкость растворителя, G_{is} – модуль упругости, A_{is} – осевая компонента тензора упругой деформации (в рамках молекулярной интерпретации A_{is} – квадрат степени растяжения макромолекулярного клубка), i идентифицирует отдельную релаксационную моду, s идентифицирует некоторое промежуточное состояние нити.

Для предельного случая маловязкого ($\eta \rightarrow 0$) полимерного раствора с одним временем релаксации (2) дает экспоненциальный закон утончения нити

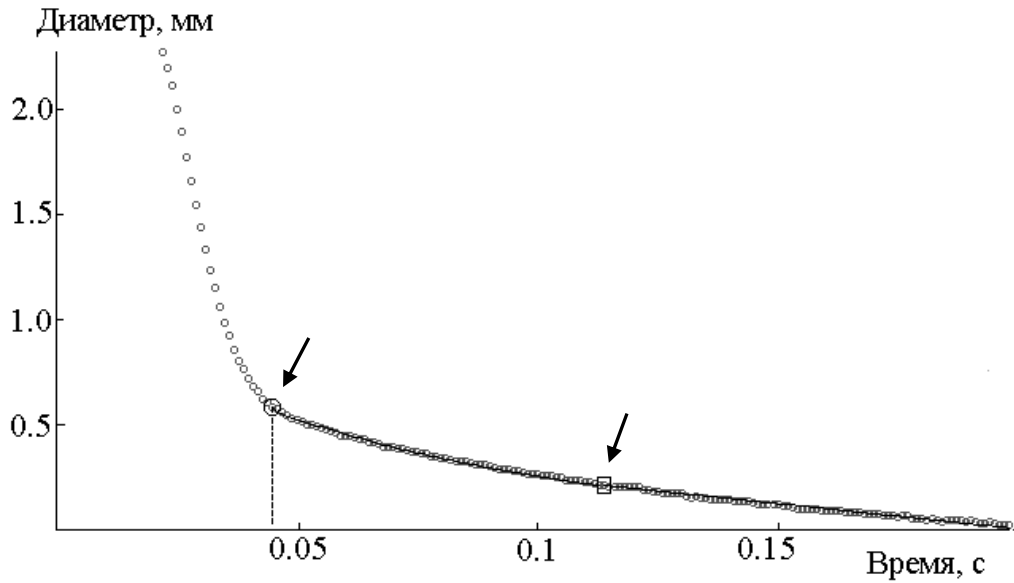
$$r = r_s \exp\left(-\frac{t-t_s}{3\theta}\right)$$

В другом предельном случае, нить неупругой вязкой жидкости ($G_i \rightarrow 0$ или $\theta_i \rightarrow 0$), получим линейный закон утончения нити ньютоновской вязкой жидкости

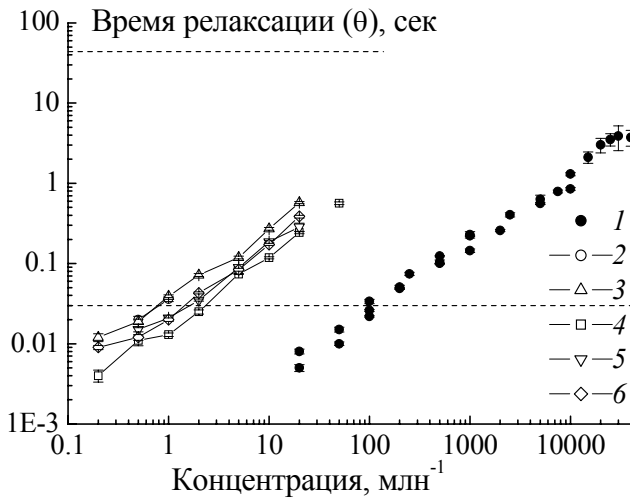
$$r = r_s - \frac{\alpha}{3\eta}(t-t_s)$$

Другая цель исследования состояла в получении из экспериментальных данных по кинетике утончения нити информации о других физических свойствах полимерной жидкости – модуле упругости и конечной растяжимости макромолекул (отношение длины полностью растянутой макромолекулы z_∞ к начальному размеру клубка z_0 , т.е. $\sqrt{A_\infty} = z_\infty/z_0$). Для этого разработан и программно реализован алгоритм определения реологических констант модели (θ , G , $\sqrt{A_\infty}$) по экспериментально измеренной зависимости диаметра жидкой нити от времени. Алгоритм основан на поиске наилучшего приближения уравнения (2) к экспериментальной зависимости $r(t)$. Пример обработки экспериментальных данных приведен на фиг. 20.

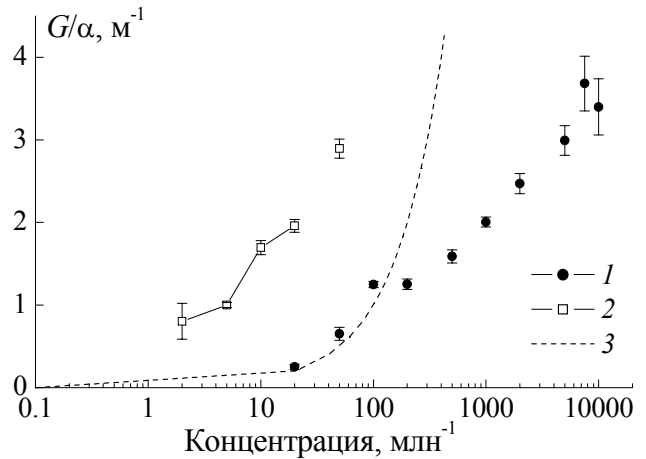
В эксперименте исследовались растворы ПАА ($M=11$ млн.) в интервале концентраций 0.00002–4%. В качестве растворителя использовались вода и водно-глицериновые смеси. Установлено, что реологическое поведение исследуемых жидкостей удовлетворительно описывается моделью Олдройда-Б с одним временем релаксации. Получены зависимости величин времени релаксации и модуля упругости от концентрации и вязкости растворителя (фиг. 21, 22). Обнаружено расхождение этих зависимостей с предсказаниями молекулярных теорий полимерных растворов.



Фиг. 20. Пример тестирования раствора ПАА в воде, $c=100 \text{ млн}^{-1}$. Кружки – экспериментальные точки, сплошная линия – аппроксимация моделью Олдройда-Б, штриховая прямая – используемая в алгоритме обработки кривая утончения нити чистого растворителя (вода). Большим кружком и стрелкой отмечена точка начала равновесной (экспоненциальной) стадии утончения. Прямоугольником и стрелкой показана точка перехода в область конечной растяжимости. Результат обработки: $\theta=0.023 \text{ с}$, $G/\alpha=1.067 \text{ м}^{-1}$, $\sqrt{A_\infty}=90.8$



Фиг. 21. Зависимость времени релаксации от концентрации раствора ПАА в воде (1), в глицерине (2–4) и в водно-глицериновой смеси (5,6). Штриховые кривые – теоретические значения, рассчитанные по молекулярной модели $\theta=\pi\eta z_0^3/kT$ для раствора ПАА в глицерине (верхняя кривая) и в воде (нижняя кривая)



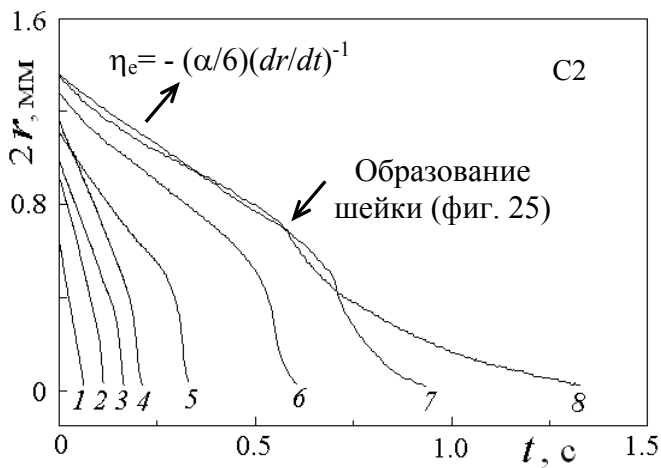
Фиг. 22. Зависимость отношения модуля упругости G к поверхностному натяжению от концентрации раствора ПАА в воде (1) и в глицерине (2). (3) – результат расчета по молекулярной модели $G=3nkT$ и $\alpha=0.066 \text{ Н/м}$ (n – число макромолекул в единице объема, kT – температура Больцмана)

Шестая глава посвящена распаду жидких мостиков суспензий твердых частиц. Цель этой части работы – впервые изучить реологическое поведение суспензий при растяжении в распадающемся мостике и продемонстрировать тем самым применимость для тестирования реологии суспензий при растяжении.

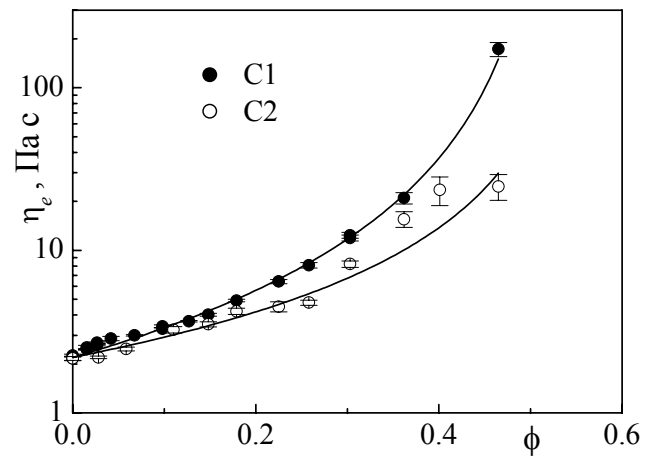
В первой части главы исследовались суспензии мелкодисперсного песка (средний диаметр 3 и 30 мкм, обозначенные соответственно С1 и С2) в глицерине с объемной долей частиц до 0.465. Сдвиговые измерения проводились на ротационном вискозиметре с коаксиальными цилиндрами. Определены зависимости сдвиговых напряжений τ и сдвиговой вязкости $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$. Кривые $\tau(\dot{\gamma})$ оказались линейными в диапазоне $\dot{\gamma}=0.5-150 \text{ с}^{-1}$, а сдвиговая вязкость постоянной во всем интервале исследуемых скоростей сдвига за исключением области близкой к нулевой скорости сдвига. Экспериментальные данные $\tau(\dot{\gamma})$ аппроксимированы моделью Бингама-Шведова $\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma}$, где τ_0 – предельное напряжение сдвига, η_B – пластическая вязкость.

Реология суспензий при растяжении исследовалась при помощи прибора *микроРЕОТЕСТЕР* (глава 5). Результаты анализировались на основе теории безынерционного утончения жидкого мостика под действием капиллярных сил, используя соотношение $dr/dt = -\alpha/6\eta_e$ (глава 5), где η_e – эффективная вязкость при растяжении. Установлено, что реологическое поведение суспензий при относительно медленном растяжении, которое реализуется на начальной стадии утончения, отвечает модели ньютоновской вязкой жидкости (линейная зависимость $r(t)$ – фиг. 23). Вместе с тем измеряемая вязкость суспензии при растяжении η_e оказалась примерно вдвое больше ее вязкости при сдвиге η_B . Причина этого расхождения заключается в том, что теория не учитывает вклад отрицательных вязких напряжений, возникающих на краях мостика в результате перетекания жидкости из мостика в примыкающие капли (глава 4).

Из представленных на фиг. 24 зависимостей η_e от концентрации твердой фазы ϕ видно, что при малых концентрациях частиц наблюдается медленный рост вязкости с концентрацией, в то время как в диапазоне высоких концентраций имеет место значительно более быстрое возрастание вязкости. При одной и той же концентрации суспензия малых частиц С1 имеет большую вязкость при растяжении, чем суспензия больших частиц С2. Экспериментальные данные фиг. 24 аппроксимированы формулой Кригера-Догерти: $\eta_e = \eta_{e0}(1-\phi/\phi_m)^{-[\eta]\phi_m}$, где η_{e0} – эффективная вязкость чистого глицерина, ϕ_m – объемная концентрация при максимальной упаковке, $[\eta]$ – характеристическая вязкость. Полученные параметры аппроксимации – $\phi_m = 0.530 \pm 0.003$, $[\eta] = 3.77 \pm 0.09$ для С1 и $\phi_m = 0.56 \pm 0.01$, $[\eta] = 2.60 \pm 0.09$ для С2 – согласуются с имеющимися в литературе данными по реологии суспензий при сдвиге.

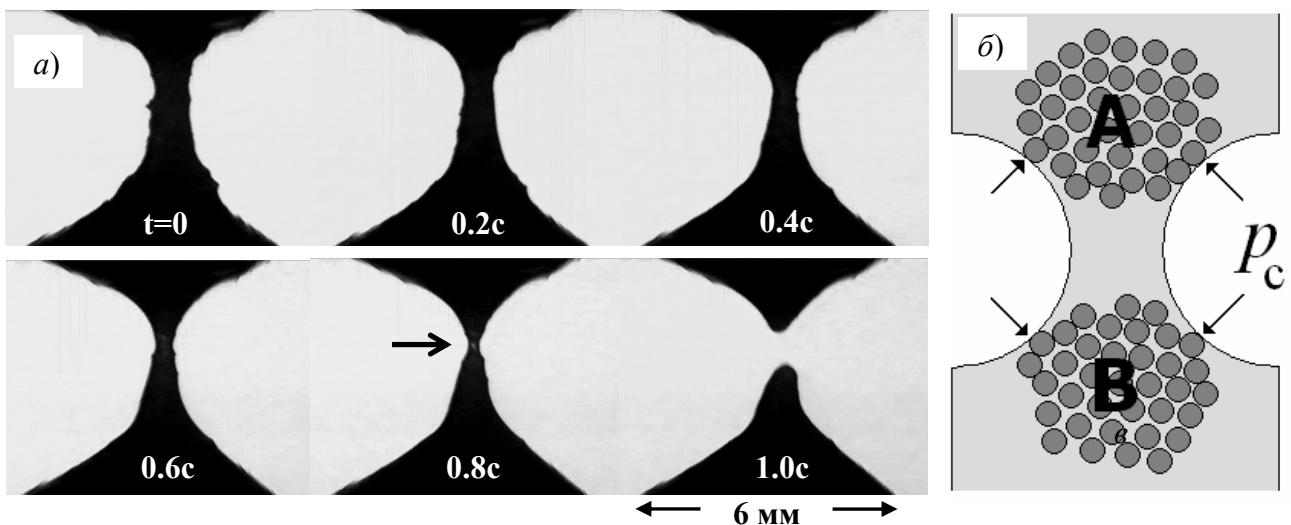


Фиг. 23. Зависимость диаметра мостика суспензий при различном содержании твердой фазы: C2 1–8 – $\phi=0, 0.110, 0.179, 0.258, 0.303, 0.362, 0.401, 0.467$



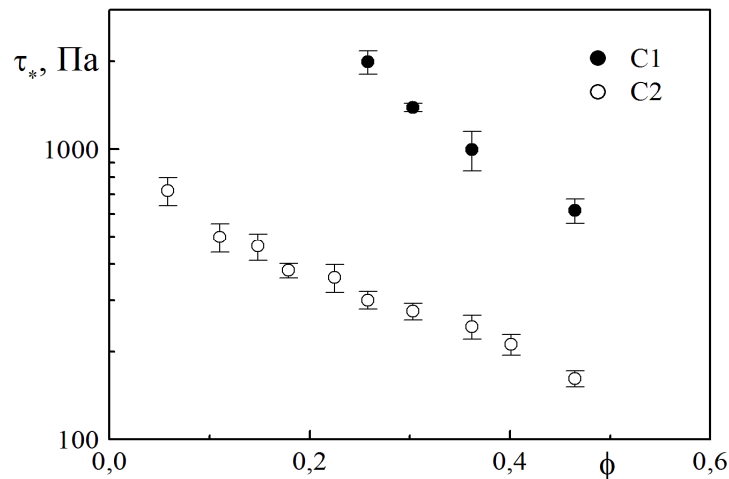
Фиг. 24. Зависимость эффективной вязкости η_e от концентрации твердой фазы ϕ и аппроксимация данных формулой Кригера-Догерти

При увеличении скорости растяжения, которое реализуется на финальной стадии утончения, обнаружено появление быстро утончающейся локальной шейки (фиг. 25, а), наподобие той, что наблюдается при разрушении пластических материалов. Это свидетельствует о локальном разупрочнении суспензии. Причина резкого ускорения распада мостика и появления характерной шейки связана с локальной перестройкой структуры суспензии, ведущей к локальному снижению концентрации суспензии, и далее к уменьшению ее вязкости вплоть до вязкости растворителя (глицерина). Действие капиллярных сил в шейке на немногочисленное семейство частиц в приповерхностном слое может вызывать перемещение значительного кластера частиц из шейки в соседние области мостика, освобождая тем самым жидкость в шейке от присутствия твердых частиц и формируя локальное разупрочнение суспензии (фиг. 25, б).



Фиг. 25. Эволюция жидкого мостика суспензии C2 (30 мкм), $\phi=0.467$ (а); стрелкой показана локальная шейка, сформировавшаяся в мостике. (б) – под действием капиллярного давления начальный кластер частиц А+В распадается на два независимых кластера А и В

Для количественных оценок условия разрушения измерены радиусы мостика r^* , соответствующие началам отклонения кривых утончения от линейной зависимости и началу формирования шейки (фиг. 23). Введено критическое напряжение в мостике, связанное с появлением шейки и оцениваемое из соотношения $\tau_* = \alpha/r^*$. Полученные в результате этого зависимости критических напряжений от концентрации суспензий показаны на фиг. 26. Имеет место уменьшение прочности суспензий с увеличением концентрации. Кроме того, наблюдается существенная разница в прочности суспензий С1 и С2. Для одной и той же концентрации суспензия малых частиц С1 значительно прочнее суспензии крупных частиц С2.



Фиг. 26. Критическое напряжение образования локальной шейки при различном содержании твердой фазы

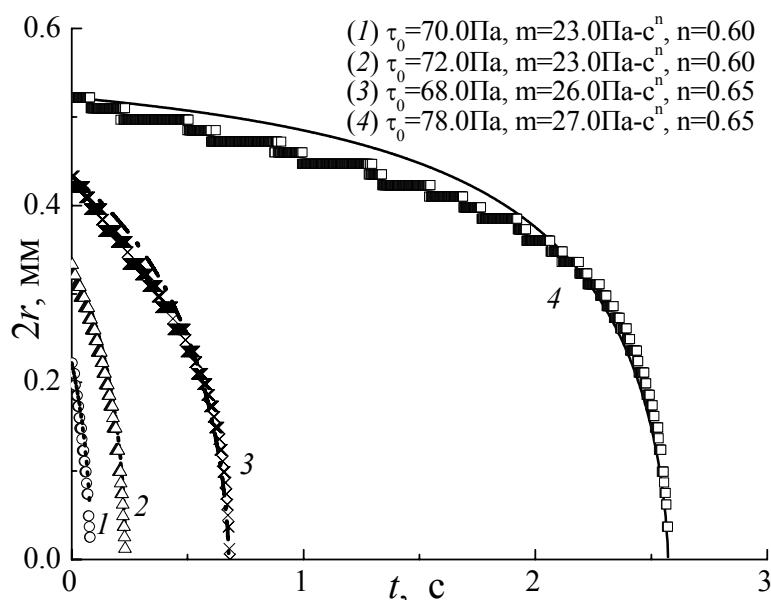
Во второй части главы изучается реологическое поведение суспензий вытянутых частиц (углеродных нанотрубок) при простом сдвиге и одноосном растяжении. Используются два типа нанотрубок PR24AG и PR24XT фирмы Ruograph III, произведенных методом химического осаждения из газовой фазы и имеющих разную относительную длину (отношение длины к внешнему диаметру), 20–50 и 200–500, соответственно. Оба типа нанотрубок – трубки с открытыми концами, внутренним диаметром 60–150 нм и средней толщиной стенки приблизительно 30 нм. Нанотрубки взвешены в вязкой ньютоновской жидкости – касторовом масле или его смесях с н-деканом. Исследовались суспензии нанотрубок PR24AG весовых концентраций до 10% и суспензии нанотрубок PR24XT концентраций до 1%.

Сдвиговые измерения проводились на вискозиметрах Brookfield с измерительной системой конус-плоскость. Изучено влияние концентрации и относительной длины нанотрубок. Установлено, что 2% суспензия нанотрубок PR24AG с относительной длиной 20–50 имеет практически постоянную вязкость в диапазоне скоростей сдвига $1-500 \text{ с}^{-1}$. Результаты для 6% и 10% суспензий указывают на псевдопластическое поведение – уменьшение вязкости с ростом скорости сдвига. Для суспензий нанотрубок R24XT с относительной длиной 200–500 псевдопластическое поведение наблюдается при всех исследованных концентрациях нанотрубок.

Измерения при растяжении, как и в случае компактных частиц песка, выполнены методом утончения жидких мостиков. Изучены эффекты концентрации и относительной длины нанотрубок, вязкости растворителя, начального диаметра нити. Для суспензий нанотрубок с относительной длиной 20–50 переход к неньютоновскому реологическому поведению (нелинейная зависимость $r(t)$) наблюдается в диапазоне концентраций 2 и 6%, в то время как 2% суспензия ведет себя как ньютоновская жидкость (линейная зависимость $r(t)$). Все суспензии нанотрубок с относительной длиной 200–500 демонстрируют неньютоновское поведение.

Таким образом, форма частиц (относительная длина) при фиксированной концентрации имеет определяющее влияние на реологическое поведение рассматриваемых суспензий.

В результате анализа экспериментальных данных показано, что в двух предельных случаях – одноосном растяжении и простом сдвиге – реологическое поведение концентрированных суспензий углеродных нанотрубок с относительной длиной 20–50 и 200–500 достаточно хорошо описывается реологическим определяющим соотношением Гершеля-Бакли (степенная жидкость с пределом текучести). Пример сравнения предсказаний теоретической модели с данными измерений приведен на фиг. 27. Степенная экспонента (n) и консистенция (m), оцененные в элонгационных и сдвиговых экспериментах, имеют близкие значения, в то время как величины предела текучести (τ_0) различаются на 40%. Это отличие в величинах предела текучести указывает на то, что предел текучести, по-видимому, не является одним из основных реологических параметров, а может зависеть от типа течения, что подтверждается данными других исследований.



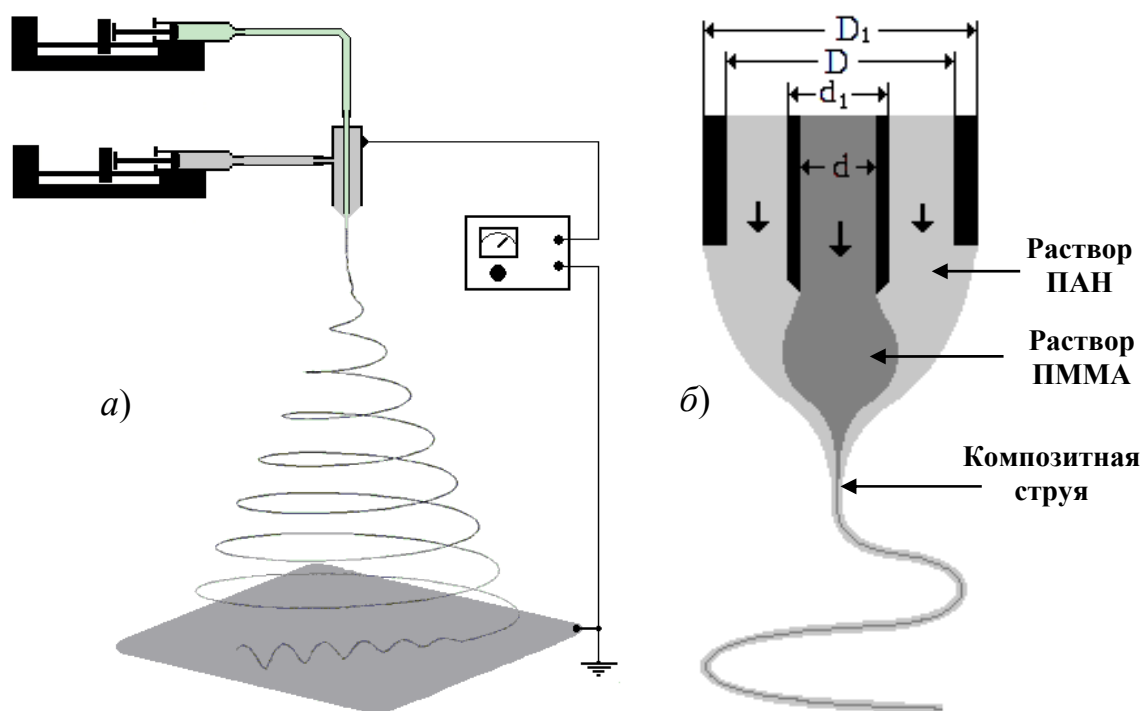
Фиг. 27. Зависимость диаметра нити от времени для суспензии нанотрубок 0.75% PR24XT для различных начальных диаметров нити: 1–4 – 0.308, 0.419, 0.559, 0.621 мм; линии – аппроксимация теоретической зависимостью $2r(t)$ для модели Гершеля-Бакли; параметры аппроксимации (m , n , τ_0) приведены на графике

Седьмая глава посвящена развитию методов получения микро/нано волокон и углеродных трубок путем растяжения струй сложных жидкостей (полимерных растворов и эмульсий) в электрическом поле (электроспиннинг).

Способ включает в себя истечение с поверхности электрически заряженной жидкой капли тонкой струи (фиг. 29). Истечение происходит под действием электрических сил и известно под названием «конус Тейлора». Если рабочей жидкостью является раствор полимера, то при определенных условиях струя не распадается на отдельные капли, а, сохраняя сплошность, подвергается спиральной неустойчивости, которая возникает благодаря взаимному электрическому отталкиванию близлежащих участков струи. Развитие спиральной неустойчивости способствует гигантскому удлинению и, соответственно, многократному утончению элементов струи. Происходит увеличение свободной поверхности жидкости, в результате чего резко ускоряется испарение растворителя и струя превращается в тонкое волокно которое попадает на заземленную металлическую поверхность, электрически нейтрализуясь. Важным фактором электроспиннинга являются упругие напряжения, возникающие при растяжении полимерной жидкости. Они подавляют капиллярную неустойчивость еще жидкого волокна (струи), обеспечивая тем самым его однородность. С другой стороны слишком большие упругие напряжения могут подавлять и «полезные» изгибные возмущения струи, замедляя или полностью останавливая электроспиннинг. Поэтому необходимым условием успешной реализации процесса является точное соответствие между реологическими свойствами полимерной жидкости и режимом ее деформирования в электрическом поле. Ситуация усложняется в случае композитного электроспиннинга (коэлектроспиннинг), т.е., когда формируется не монолитное волокно, а волокно, имеющее сердцевину и внешнюю оболочку. При этом жидкости внутренней и внешней струи могут обладать различными реологическими и капиллярными свойствами.

В первой части главы описана методика получения композитного полимерного микро/нановолокна и углеродных микро/нанотрубок в принципе неограниченной длины. Задача заключалась в правильном подборе начальных скоростей внешней и внутренней струи, реологических свойств внешней и внутренней жидкостей, а также параметров электрического поля, чтобы обеспечить капиллярную устойчивость композитной струи в процессе ее растяжения при электроспиннинге. Для исследования реологических свойств полимерных жидкостей применялись методы стандартной сдвиговой вискозиметрии и разработанный в диссертации метод самоутончающейся нити (глава 5).

В качестве жидкости оболочки использовались растворы полиакрилонитрила (ПАН, $M=0.15$ млн.) концентраций 8–15% в диметилформамиде (ДМФА). Жидкость сердцевины – растворы полиметилметакрилата (ПММА, $M=1$ млн.) концентраций 8–15% в ДМФА или его смесях с ацетоном. Размеры коаксиальных сопел (фиг.29, б): $d=0.42$ мм, $d_1=0.64$ мм, $D=1.2$ мм, $D_1=1.75$ мм.

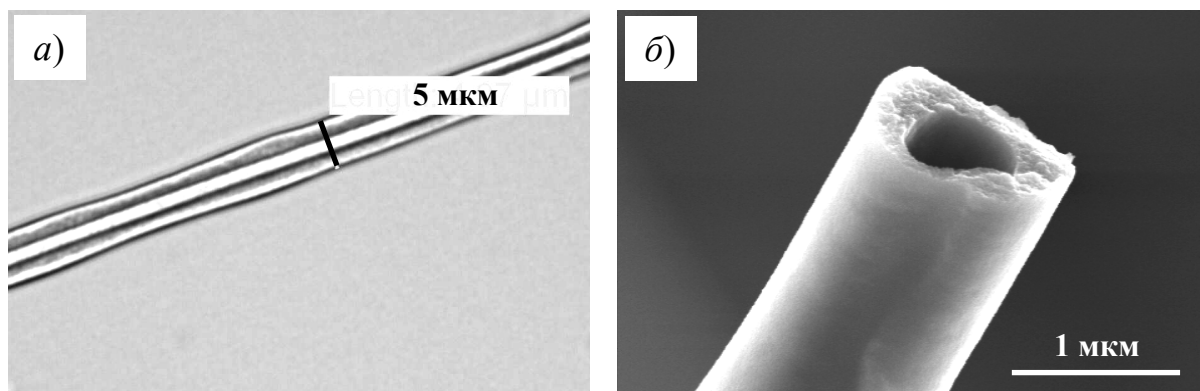


Фиг. 29. Схема экспериментальной установки (а) и коаксиальных сопел (б)

Полимерные растворы подавались в коаксиальные сопла двумя шприцевыми насосами. Диапазон исследованных расходов жидкостей сердцевины и оболочки составлял 0.1–2 мл/ч. В ходе коэлектроспиннинга растворы подвергались действию электростатического поля напряженностью порядка 30 кВ/м (6–8 кВ на расстоянии 180 мм). Получаемые волокна собирались на заземленном алюминиевом диске, который располагался на 180 мм ниже выходных сопел.

Установлено, что во всех случаях формируется однородная цилиндрическая сердцевина, что объясняется низким поверхностным натяжением границы раздела внутренней и внешней жидкостей, приготовленных на базе одного растворителя. В то же время, внешняя граница композитной струи может испытывать значительную капиллярную неустойчивость вплоть до разрыва. При больших скоростях подачи внешней жидкости существенно нарушается центровка внутренней струи.

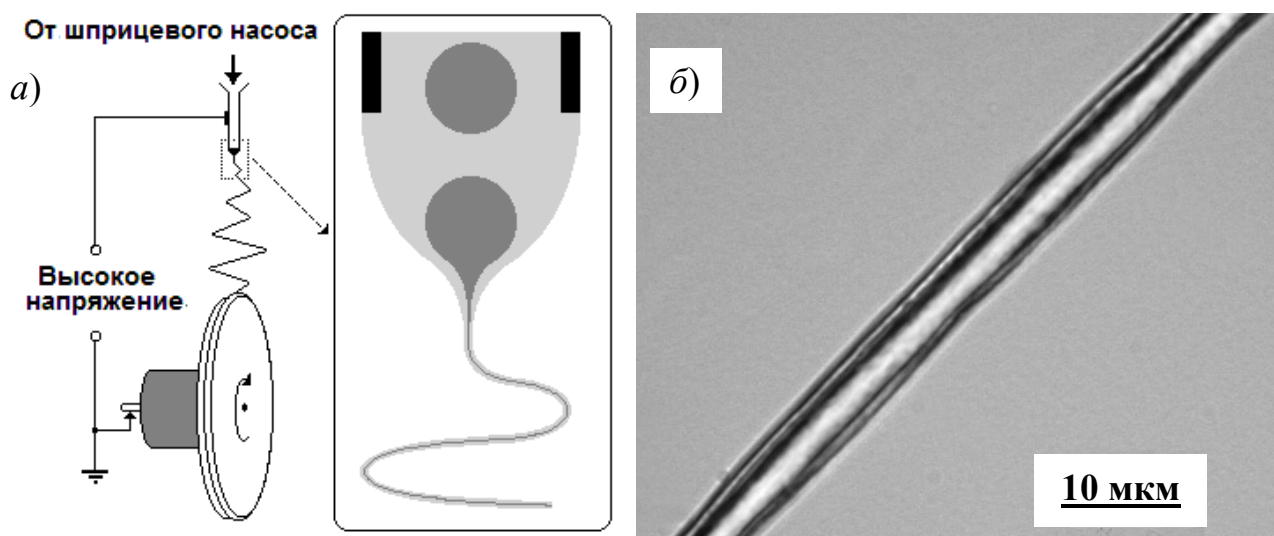
Экспериментально показано, что правильный выбор параметров электроспиннинга и реологических свойств полимерных растворов обеспечивает подавление капиллярной неустойчивости струи и получение однородного композитного волокна (фиг. 30, а). Последующая высокотемпературная обработка полученного волокна разлагает полимер сердцевины (ПММА), а полимер оболочки (ПАН) превращает в углерод турбостратной структуры. В результате образуется углеродная трубка (фиг. 30, б).



Фиг. 30. Оптическая микрофотография композитного ПАН-ПММА полимерного волокна (а) и электронная фотография карбонизированного волокна (б)

В ходе электроспиннинга композитного волокна и последующей его термообработки наблюдались нежелательные процессы: выпучивание сердцевины волокна, разрывы стенки трубки. Проанализированы возможные причины и механизмы этих явлений и пути их преодоления.

Вторая часть главы посвящена разработке нового метода композитного электроспиннинга. Стандартная схема требует достаточно сложной системы коаксиальных сопел. В диссертации представлена технология получения композиционного волокна из одиночного сопла. Для этого использовалась система подачи жидкости как в обычном электроспиннинге при получении монолитного волокна (одиночное сопло и дозатор), но рабочая жидкость имела специальную структуру – смесь двух несмешиваемых друг с другом растворов полимеров в одном растворителе. В результате образовывалась эмульсия каплей (100–200 мкм) одной полимерной жидкости (используемой для сердцевины) в другой жидкости (которая использовалась для оболочки волокна). При подаче такой полимерной композиции в одиночное сопло, капли сердцевинной жидкости останавливаются у основания конуса Тейлора внешней жидкости (фиг. 31, а).



Фиг. 31. Электроспиннинг полимерной смеси, подаваемой из одиночного сопла (а). Оптическое изображение получаемого композитного ПАН-ПММА волокна (б)

Теоретический анализ течения внутри внешней капли показал, что оно способно вытягивать из внутренней капли тонкую струю и таким образом формировать начальную композитную структуру, которая затем растягивается в электрическом поле по механизму электроспиннинга. Используя в качестве полимера для внутренней струи ПММА, для внешней оболочки – ПАН, растворитель – ДМФА, удалось получить длинные отрезки (~1 м) композитного волокна с внешним диаметром 0.5–5 мкм (фиг. 31, б). Последующая высокотемпературная обработка волокна привела к образованию углеродных трубок, аналогичных полученным описанным выше методом электроспиннинга из коаксиальных сопел.

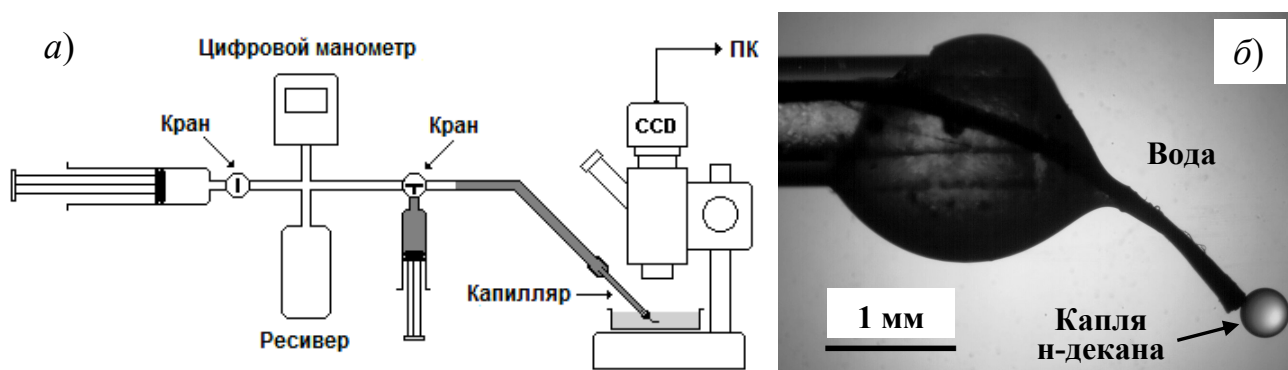
В третьей части главы демонстрируется возможность осуществить течение жидкости или газа через полученные макроскопически длинные (~10 мм) углеродные микро/нано трубки. Для того чтобы измерить малые объемные расходы жидкости в трубках, они объединены в пучок. Цель данной части работы – создать такой пучок и изучить гидродинамические особенности течения в трубках пучка.

Пучки углеродных трубок производились с помощью несколько модифицированной методики, описанной в первой части главы. Модификация заключалась в использовании вращающегося в вертикальной плоскости дискового электрода, аккумулирующего кольца композитного волокна на своем заостренном крае (фиг. 31, а). После высокотемпературной обработки пучки волокон превращались в пучки углеродных трубок, состоящих из большого числа параллельных трубок внутренним радиусом в диапазоне 0.5–1.8 мкм.

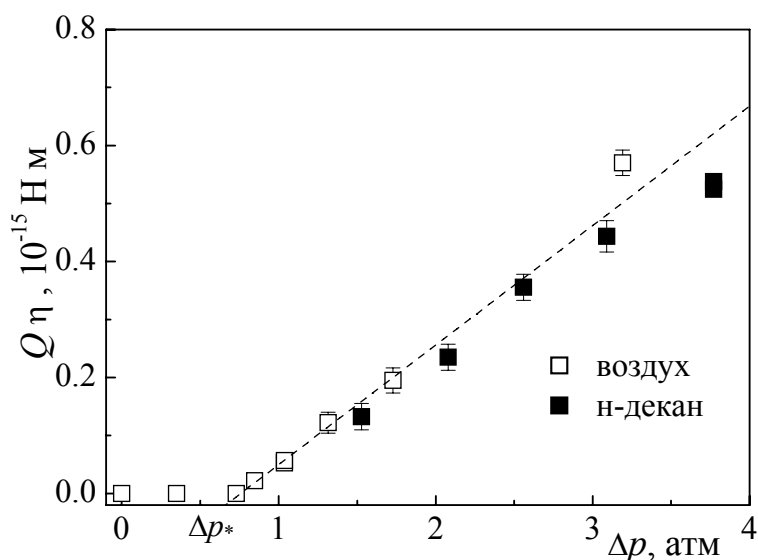
Создана микрогидродинамическая установка, схема которой показана на фиг. 32, а. Типичный пучок углеродных трубок имел длину около 10 мм и диаметр 200 мкм. Пучок вставлялся в кончик стеклянного капилляра (внутренний диаметр 0.58 мм) и фиксировался там эпоксидным компаундом. Выход жидкости или газа происходил при постоянном напорном давлении (до 4 атм), которое создавалось ручной накачкой при помощи 10-мл шприца. Чтобы визуализировать и измерить медленный (~1 мм³/час) выход жидкости (н-декан) или газа (воздух) из пучка, кончик капилляра с пучком трубок погружался в плоскую кювету с водой и наблюдался в микроскоп, оснащенный видеокамерой. Обработывая записи процесса роста капли (или пузырька), измерялась зависимость диаметра капли (или пузырька) от времени из которой определялся объемный расход на выходе из пучка Q при заданном напорном давлении Δp . Числа Рейнольдса в рассматриваемом случае имели порядок 10^{-2} и 10^{-3} (ламинарный режим) для газа и жидкости, соответственно.

Результаты измерений представлены на фиг. 33 в виде зависимости произведения $Q \times \eta$ от перепада давления. Закон Пуазейля для несжимаемых жидкостей предсказывает, что объемный расход Q обратно пропорционален вязкости жидкости η . Поэтому для течения различных жидкостей через один и тот же пучок трубок при одинаковом перепаде давления произведение $Q \times \eta$ должно быть одним и тем же. Значения для газа тоже ложатся на единую зависимость $Q \times \eta(\Delta p)$. В работе это объясняется тем, что при данных давлениях

сжимаемость газа еще не оказывает заметного влияния на его расход на выходе из пучка. Кроме того, незначительные утечки газа через боковую поверхность пучка, которые было невозможно учесть количественно в эксперименте, тоже несколько уменьшают измеряемое значение расхода. Согласно закону Пуазейля для несжимаемой жидкости зависимость $Q(\Delta p)$ должна быть линейной и проходить через начало координат. Экспериментальные данные указывают на зависимость вида $Q \propto (\Delta p - \Delta p^*)$, что свидетельствует о «памяти» в отношении давления начала течения Δp^* . В диссертации этот результат, объясняется дискретизацией процесса открытия трубок, имеющих различные внутренние диаметры и первоначально заблокированных для течения капиллярным давлением на границах раздела вода/н-декан (или вода/воздух). Используя данную интерпретацию экспериментальных результатов, предложена процедура определения распределения диаметров пропускающих жидкость трубок, исходя из измеренной зависимости $Q(\Delta p)$.



Фиг. 32. Схема микрогидродинамической установки (а). Капля н-декана, растущая на кончике погруженного в кювету с водой пучка углеродных трубок (б)



Фиг. 33. Зависимость произведения вязкости и объемного расхода на выходе из пучка в зависимости от перепада давления Δp

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Продемонстрированы и изучены неизвестные ранее струйные конфигурации: вертикальные, горизонтальные, зигзагообразные, а также микро/нано коаксиальные структуры утончающихся нитей упруговязких жидкостей. Управляющим фактором таких течений является упругость жидкости.
2. Созданы методы регистрации и анализа подобных течений, позволяющие на основе уравнений сохранения массы и импульса определять весь комплекс кинематических и динамических характеристик движения: скорость, деформацию, скорость деформации, напряжения и силы в исследуемых жидких объектах.
3. Измерениями показана возможность формирования сил величиной $10^{-6} - 10^{-4}$ Н в растворах высокомолекулярных полимеров с массовой долей $10^{-8} - 10^{-1}$ при 10–1000 кратном деформировании на временных интервалах от 10^{-3} до 10^2 с. Совокупность возможностей позволяет рассматривать самоутончающуюся нить (жидкий мостик), как разрывную машину для исследования широкого класса жидкостей.
4. Апробированы реологические модели Олдройда-Б и степенной жидкости для описания реологии растворов полимеров и суспензий частиц в режиме интенсивного растяжения в самоутончающейся нити. Определение констант реологических моделей показало ограниченность предсказаний известных молекулярных теорий.
5. Создана методика получения композитного волокна и углеродных микро/нанотрубок путем электроспиннинга струи эмульсии двух полимерных растворов из одиночного сопла. Получаемые волокна и микро/нанотрубки обладают структурой, которая достигалась ранее только при использовании коаксиальных сопел.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Из Перечня ВАК РФ:

1. *Базилевский А.В., Воронков С.И., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Ориентационные эффекты при распаде струй и нитей разбавленных растворов полимеров // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257. № 2. С. 336-339.
2. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Упругие напряжения в струях растворов полимеров // Известия АН СССР. МЖГ. 1985. № 2. С. 3-9.
3. *Добрых В.А., Базилевский А.В., Рожков А.Н.* Изучение вязко-упругих свойств содержимого дыхательных путей методом утончающейся нити // Лабораторное дело. 1988. № 7. С. 26-27.
4. *Базилевский А.В., Лернер М.М.* Релаксационные свойства растворов полиакриламида // Известия Вузов. Нефть и газ. 1989. С. 41-42.
5. *Базилевский А.В., Рожков А.Н., Фаустова М.Е.* Реологический контроль муколитической терапии у больных неспецифическими заболеваниями легких // Пульмонология. 1992. № 4. С. 17-20.
6. *Bazilevsky A.V., Entov V.M., Rozhkov A.N.* The first experience of application of Rheotester device in biorheology // Biorheology. 1992. V. 29. № 1. P. 157.
7. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Лернер М.М., Рожков А.Н.* Распад нитей полимерных растворов // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1997. Т. 39. № 3. С. 474-482.
8. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Распад мостика жидкости Олдройда – метод реологического тестирования полимерных растворов // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2001. Т. 43. № 7. С. 1161-1172.
9. *Базилевский А.В., Мейер Д.Д., Рожков А.Н.* Динамика сферической микрокаверны в полимерной жидкости // Известия РАН. МЖГ. 2003. № 3. С. 3-16.
10. *Bazilevsky A.V., Kornev K.G., Rozhkov A.N., Neimark A.V.* Spontaneous absorption and viscoelastic fluids by capillaries and porous substrates // Journal of Colloid and Interface Science. 2003. V. 262. № 1. P. 16-24.
11. *Базилевский А.В., Мейер Д.Д., Рожков А.Н.* Динамика и разрушение импульсных микроструй полимерных жидкостей // Известия РАН. МЖГ. 2005. № 3. С. 45-63.
12. *Базилевский А.В., Рожков А.Н.* Динамика и разрушение зигзагообразных струй полимерных жидкостей // Известия РАН. МЖГ. 2006. № 4. С. 7-18.
13. *Zussman E, Yarin A.L., Bazilevsky A.V., Avrahami R., Feldman M.* Electrospun polyacrylonitrile/poly(methyl methacrylate) – derived turbostratic carbon micro-/nanotubes // Advanced Materials. 2006. V. 18. P. 348-353.
14. *Bazilevsky A.V., Yarin A.L., Megaridis C.M.* Co-electrospinning of core-shell fibers using a single-nozzle technique // Langmuir. 2007. V. 23. P. 2311-2314.
15. *Bazilevsky A.V., Sun K., Yarin A.L., Megaridis C.M.* Selective intercalation of polymers in carbon nanotubes // Langmuir. 2007. V. 23. P. 7451-7455.
16. *Bazilevsky A.V., Sun K., Yarin A.L., Megaridis C.M.* Room-temperature, open-air, wet intercalation of liquids, surfactants, polymers and nanoparticles within nanotubes and microchannels // J. Mater. Chem. 2008. V. 18. P. 696-702.

17. *Bazilevsky A.V., Yarin A.L., Megaridis C.M.* Pressure-driven fluidic delivery through carbon tube bundles // *Lab Chip*. 2008. V. 8. P. 152-160.
18. *Srikar R., Yarin A.L., Megaridis C.M., Bazilevsky A.V., Kelly E.* Desorption-limited mechanism of release from polymer nanofibers // *Langmuir*. 2008. V. 24. P. 965-974.
19. *Базилевский А.В., Рожков А.Н.* Движение сферы по наклонной плоскости в потоке вязкой жидкости // *Известия РАН. МЖГ*. 2009. № 4. С. 100-112.
20. *Tiwari M.K., Bazilevsky A.V., Yarin A.L., Megaridis C.M.* Elongational and shear rheology of carbon nanotube suspensions // *Rheol. Acta*. 2009. V. 48. № 6. P.597-609.
21. *Базилевский А.В., Коротеев Д.А., Рожков А.Н., Скобелева А.А.* Седиментация частиц в сдвиговых потоках вязкоупругих жидкостей // *Известия РАН. МЖГ*. 2010. № 4. С. 130-142.
22. *Александров А.Н., Базилевский А.В., Ентов В.М., Рожков А.Н., Шараф А.* Распад капиллярного мостика суспензий // *Известия РАН. МЖГ*. 2010. № 6 . С. 133-147.
23. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Распад жидкого мостика – метод тестирования биологических жидкостей // *Известия РАН. МЖГ*. 2011. №. 4 . С. 119-129.
24. *Базилевский А.В., Рожков А.Н.* Динамика микроструй и нитей сложных жидкостей // *Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского*. 2011. № 4. Часть 5. С. 1987-1988.
25. *Базилевский А.В.* Динамика горизонтальных нитей вязкоупругих жидкостей // *Известия РАН. МЖГ*. 2013. №. 1 . С. 111-124.
26. *Базилевский А.В., Рожков А.Н.* Динамика капиллярного распада упругих струй // *Известия РАН. МЖГ*. 2014. №. 6 . С. 145-163.
27. *Базилевский А.В., Рожков А.Н.* Динамика капиллярного распада мостиков упругих жидкостей // *Известия РАН. МЖГ*. 2015. №. 6 . С. 101-116.

Другие публикации:

28. *Базилевский А.В., Воронков С.И., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Ориентационные эффекты при распаде струй и нитей разбавленных растворов полимеров // В кн.: Новое в реологии полимеров. Материалы XI Всесоюзного симпозиума по реологии, Суздаль, 1980, выпуск II. Москва. 1981. С. 281-285.
29. *Базилевский А.В.* Упругие напряжения в струях разбавленных растворов полимеров // Материалы XIII Всесоюзного симпозиума по реологии. Волгоград. 1984. С.84.
30. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Способ определения времени релаксации упруговязких жидкостей: А.С. № 1318845 (СССР) // *Бюллетень изобретений*. 1987. № 23. С. 144.
31. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Карпов А.Н.* Экспериментальное исследование релаксационных свойств растворов полимеров по кинетике утоньшения нитей // В сборнике: Физико-химические процессы в преобразователях энергии. М.: МФТИ. 1987. С. 98-102.

32. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Карпов А.Н.* Исследование деградационных процессов в полимерных растворах // В сборнике: Элементарные процессы в химически реагирующих средах. М.: МФТИ. 1988. С.83-84.
33. Авт. свид. № 1539591 (СССР) Способ определения времени релаксации упруговязких жидкостей / *Лернер М.М., Швецов И.А., Масленников В.А., Ентов В.М., Соляков Ю.В., Базилевский А.В., Кабо В.Я., Рожков А.Н.* 1987. Бюллетень изобретений. 1990. № 4. С. 156.
34. *Bazilevsky A.V., Entov V.M., Rozhkov A.N.* Liquid filament microrheometer and some of its applications // Proc. of the Golden Jubilee Meeting of the British Society of Rheology and Third European Rheology Conf. 1990, Edinburgh, UK. L.; N.Y.: Elsevier, 1990. P. 41-43.
35. *Bazilevsky A.V., Entov V.M., Rozhkov A.N., Yarin A.L.* Polymeric jets beads-on-string breakup and related phenomena // Proc. of the Golden Jubilee Meeting of the British Society of Rheology and Third European Rheology Conf. 1990, Edinburgh, UK. L.; N.Y.: Elsevier, 1990. P. 44-46.
36. *Bazilevsky A., Entov V., Rozhkov A.* Dynamic experiments in studies of strong flows of polymeric fluids. // Progress and Trends in Rheology IV. Proceedings of the Fourth European Rheology Conference. 1994, Sevilla, Spain. Darmstadt: Steinkopff, 1994. P. 466-467.
37. *Bazilevsky A., Rozhkov A., Stavitsky A.* Stresses in the filaments of polymer solutions // Progress and Trends in Rheology IV. Proc. of the 4th European Rheology Conf. Sevilla. 1994, Sevilla, Spain. Darmstadt: Steinkopff, 1994. P. 468-470.
38. Патент РФ № 2120256 Способ испытания искусственных клапанов сердца / *Вильданов Л.М., Базилевский А.В., Рожков А.Н., Юречко В.Н.* 1997.
39. *Bazilevsky A.V., Meyer J.D., Rozhkov A.N.* Effects of polymeric additives on vapor bubble dynamics in thermal ink jet printing // Final Program and Proceedings of IS&T's NIP14: International Conference on Digital Printing Technologies. 1998, Toronto, Canada. IS&T, 1998. P. 15-18.
40. *Meyer J., Bazilevsky A.V., Rozhkov A.N.* Effects of polymeric additives on thermal ink jets // In: Recent Progress in Ink Jet Technologies II / Ed. Hanson E., Series Ed. Eschbach R. IS&T, 1999. P. 450-455.
41. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Живая нитка // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 8. С. 115-121.
42. *Базилевский А.В., Рожков А.Н.* Реологические эффекты при распаде струй и нитей неньютоновских жидкостей // К 75-летию со дня рождения профессора Владимира Марковича Ентова. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 180 с. ISBN 978-5-4344-0074-9. С. 49-69.
43. *Базилевский А.В.* Измерение сил натяжения капиллярных струй и мостиков полимерных жидкостей с помощью обработки изображений // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и прикладным программным системам, 24-31 мая 2015 г., Алушта. ISBN 978-5-4316-0242-9. С. 564-566.

Базилевский Александр Викторович

Динамика и распад струй сложных жидкостей

Автореферат на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Подписано к печати _____ 2016 г.

Тираж 100 экз.

Заказ № _____

Отпечатано в Институте проблем механике им. А.Ю. Ишлинского РАН
119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1