

ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ
им. М.А. Лаврентьева

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Проспект Академика Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090
Для телеграмм: Новосибирск-90, Гидродинамика
Тел./факс: (8-383) 333-16-12. E-mail: igil@hydro.nsc.ru

09.03.2016 № 15320 – 01/2141

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

д.ф.-м.н. С.В. Головин



ОТЗЫВ

ведущей организации на докторскую диссертацию **Базилевского Александра Викторовича «Динамика и распад струй сложных жидкостей»** по специальности **01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы**

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию струй и микро- течений реологически сложных жидкостей. **Актуальность тематики** обусловлена фундаментальностью проблемы реологии жидкостей с анизотропными деформируемыми микровключениями, а также многочисленными приложениями, связанными с изучением и экспресс-анализом параметров физиологических течений, совершенствованием технологий струйной печати, формирования нановолокон методом электроспиннинга и т.д.

В **первой главе** дан обзор литературы и приводится сравнительный анализ работ соискателя.

Во **второй главе** рассматриваются нити, возникающие при капиллярном распаде струй и одиночных мостиков полимерных растворов. Разработан метод измерений силы натяжения нитей, основанный на анализе формы капли, примыкающей к нити. Определены напряжения в нити и количественно оценен эффект гидродинамического взаимодействия нити с примыкающей каплей. Приведен теоретический анализ перетекания жидкости из нити в каплю и рассмотрен вопрос о напряжениях при растяжении нити и в условиях одноосного сжатия при течении в капле. Анализируются инерционные эффекты и причины распада нити на поздней стадии ее утончения.

Третья глава посвящена истечению струи воды с добавками полимера из поперечно колеблющегося капилляра. Наблюдаемые зигзагообразные

структуры объясняются упругостью полимерной жидкости. Анализ формы зигзагообразной струи позволяет найти распределение упругих напряжений в струе и установить закономерности реологического поведения полимерных растворов в интенсивных струйных течениях. Построен алгоритм численного расчета профилей зигзагообразных струй.

В четвертой главе исследуются горизонтальные мостики (нити) полимерных растворов. Измерена сила натяжения таких нитей путем использования самой нити в качестве чувствительного датчика силы. Определены осевые напряжения в нити и эффекты перетекания жидкости из нити в примыкающие капли. Предложена модификация стандартного реологического метода капиллярной нити, не опирающегося на какие-либо гипотезы о характере распределения напряжений в нити. Продemonстрировано существование простого критерия устойчивого утончения горизонтальной нити. Обнаружены и проанализированы периодические поперечные колебания оси нити.

В пятой главе описываются эксперименты по зависимости диаметра нити от времени. Выяснены закономерности самоутончения и разрыва капиллярных мостиков (нитей) растворов высокомолекулярных полимеров. Проанализированы возможные физические механизмы разрыва нити. С помощью распада жидкого мостика (нити) изучены реологические свойства полимерной жидкости. Теоретически описан процесс утончения нити с учетом вязкости растворителя и конечной растяжимости макромолекул. Поведение жидкости при ее деформации в мостике (нити) моделируется обобщенным реологическим уравнением Олдройда, учитывающим нелинейные эффекты, конечную растяжимость макромолекул и наличие спектра времен релаксации. Разработан и программно реализован алгоритм определения реологических констант модели по экспериментально измеренной зависимости диаметра нити от времени. Экспериментально изучен процесс утончения нитей растворов полимеров с различной вязкостью растворителя. Установлено, что реологическое поведение исследуемых жидкостей описывается моделью Олдройда с одним временем релаксации. Получены зависимости величин времени релаксации и модуля упругости от концентрации и вязкости растворителя. Результаты сравниваются с предсказаниями молекулярных теорий разбавленных полимерных растворов.

В шестой главе распад жидкого мостика под действием капиллярных сил используется для изучения реологии суспензий при растяжении. Эксперименты проведены с суспензиями мелкодисперсного (3 и 30 мкм) песка в глицерине. Процесс утончения мостика отслеживался с помощью электроннооптической измерительной системы и видеосъемки, а результаты анализировались на основе развитой ранее теории утончения жидкого мостика. Установлено, что реологическое поведение суспензий при относительно медленном растяжении, реализуемом на начальной стадии

утончения, отвечает модели ньютоновской вязкой жидкости. Вместе с тем измеряемая эффективная вязкость суспензии при растяжении оказалась примерно вдвое больше ее вязкости при сдвиге. Проанализирована причина этого расхождения. Также обнаружено, что при увеличении скорости растяжения на финальной стадии утончения нити происходит разупрочнение суспензии, проявляющееся в формировании быстро утончающейся локальной шейки, наподобие той, что наблюдается при разрушении пластических материалов. Похожие эксперименты проведены с концентрированными суспензиями углеродных нанотрубок в ньютоновских жидкостях – касторовом масле и его смесях с н-деканом. Для описания процесса самоутончения нити используется квазиодномерная модель, при этом введена коррекция, учитывающая неоднородность нити. Исследованы эффекты концентрации, длины нанотрубок, вязкости базовой жидкости. Результаты для одноосного растяжения сравниваются с результатами для простого сдвига. Показано, что реологическое поведение суспензий нанотрубок при растяжении и сдвиге описывается реологической моделью Гершеля-Бакли. Оказалось, что предельные напряжения начала течения при растяжении приблизительно на 40% больше чем при простом сдвиге. Это указывает на необходимость модификации модели.

Седьмая глава посвящена разработке новых гидродинамических методик получения длинных композитных микро/нановолокон и углеродных микро/нано трубок путем электроспиннинга композитных струй полимерных растворов и эмульсий. Анализируются наблюдаемые явления и объясняются механизмы, лежащие в основе формирования композитных волокон и углеродных нанотрубок. Кроме этого экспериментально реализованы контролируемые ламинарные течения жидкости или газа через полученные макроскопически длинные (~10 мм) углеродные трубки и объясняются характерные свойства таких течений. Создана экспериментальная установка, особенностью которой является использование большого числа параллельных углеродных трубок, объединенных в пучок. Предложена процедура восстановления распределения диаметра пропускающих жидкость трубок, исходя из измеренной зависимости объемного расхода от приложенного перепада давления.

Достоверность представленных в диссертации А.В. Базилевского экспериментальных и теоретических результатов не вызывает сомнений, поскольку при проведении эксперимента использованы проверенные методы сбора и обработки информации, а разработанные в диссертации новые методики были всесторонне протестированы, в теоретической части работы использованы классические подход, основанный на анализе уравнений сохранения массы и импульса. В рамках работы теоретические и экспериментальные результаты дополняют друг друга и не содержат внутренних логических противоречий.

Диссертация прошла всестороннюю **апробацию**. Работа была доложена на многочисленных российских и международных конференциях, а также авторитетных семинарах. По теме диссертации опубликовано более 40 работ, в числе которых 27 статей в реферируемых журналах, учитываемых ВАК Министерства образования и науки РФ при защитах докторских диссертаций. Результаты диссертационной работы были доложены и получили положительную оценку на научном семинаре Отдела прикладной гидродинамики ИГиЛ СО РАН (руководитель семинара - член-корреспондент РАН В.В. Пухначев). Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Говоря о новизне, можно выделить следующие результаты.

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

Значимость для науки и практики. Результаты по струям могут найти применение в технологии струйных принтеров, 3D принтеров, печатной микроэлектроники, глубокой печати, нанесении покрытий, распыливании жидкостей, производстве лекарств и др.

Реологические свойства сложных жидкостей, измеренные в режиме одноосного растяжения, могут быть использованы при построении новых реологических уравнений состояния жидкостей.

Созданные экспериментальные методики реализованы в серийно выпускаемом элонгационном реометре HAAKE CaBER1 (Thermo Electron Corporation) и используются в ведущих мировых научных центрах для испытания жидкостей в режиме одноосного растяжения, для изучения физико-химических процессов в жидкостях, для медицинской диагностики и лечения, для разработки искусственных клапанов сердца.

Разработанные методы получения композитных микро/нановолокон и углеродных микро/нанотрубок перспективны для многочисленных приложений в микроэлектронике, медицине, и др.

Полученные пучки макроскопически длинных микро/нанотрубок и обнаруженные закономерности течения в них жидкости или газа могут быть использованы при разработке различных микро/наноструйных устройств.

Результаты могут быть использованы в Институте гидродинамики СО РАН, в Институте теплофизики СО РАН, в Новосибирском государственном университете.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

- 1) Говоря о вязкости сжимаемой жидкости во второй главе, автор не уточняет о какой вязкости идет речь - о сдвиговой или объемной.
- 2) В настоящее время к нерешенным реологическим проблемам относится вопрос об определяющих уравнениях сжимаемой жидкости Бингама. Несомненно прогрессом можно считать результаты шестой главы, где установлено, что предельные напряжения для сдвигов и растяжений различны. Однако сжимающие деформации остались вне поля экспериментов. Кроме того, следовало бы прояснить роль поверхностного натяжения при оценке предельного напряжения сдвига для растягивающих деформаций путем добавок поверхностно активных веществ.
- 3) Значительную часть объема диссертации составляют экспериментальные исследования. В диссертации систематически используется цифровая обработка оптических изображений (оценка формы капель, прогиба и диаметра жидких нитей и т.д.). Было бы полезно кратко изложить основные идеи алгоритмов, применяемых автором для первичной обработки изображений (выделение границ струи и т.п.) и привести оценки их точности.
- 4) В конце второй главы автором сделан вывод о том, что «расчет любых элонгационных течений, включающих в себя переход от деформации растяжения к деформации сжатия (например, движение жидкости через

каналы переменного сечения), должен учитывать изменение реологического поведения жидкости при смене типа деформации». Указанная проблема связана с задачей об ориентации частиц в микроканалах переменного сечения. По последней задаче в последнее время получено много интересных результатов, например:

Trebbin et al. (2013) "Anisotropic particles align perpendicular to the flow direction in narrow microchannels" PNAS Vol.110(17), 6706-6711

Hakansson et al (2014) "Hydrodynamic alignment and assembly of nanofibrils resulting in strong cellulose filaments" Nature communications, Vol.5, article number 4018.

Поскольку в данных работах предложено объяснение различного поведения жидкостей с анизотропными частицами при смене типа деформации их следовало бы упомянуть в обзоре литературы. Изучение аналогичных эффектов при замене твердых стенок микроканалов на свободную поверхность жидких нитей могло бы стать интересным направлением дальнейших исследований.

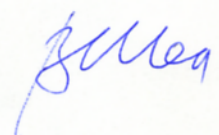
Изложенные в отзыве замечания не умаляют ценности диссертационной работы А.В. Базилевского. Представленные в диссертации результаты комплексного экспериментально-теоретического исследования элонгационных деформаций струй реологически сложных жидкостей могут расцениваться как существенное продвижение в решении крупной проблемы современной гидродинамики в области струй и реологии сложных жидкостей.

Диссертация Базилевского Александра Викторовича «Динамика и распад струй сложных жидкостей» соответствует специальности 01.02.05 – механика жидкостей, газа и плазмы и удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, автореферат соответствует диссертации, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв составили

Д.ф.-м.н., проф., зав. лабораторией фильтрации
Института гидродинамики

В.В. Шелухин



Д.ф.-м.н., зав. лабораторией экспериментальной
прикладной гидродинамики Института гидродинамики

Е.В. Ерманюк



Отзыв заслушан и утвержден в качестве официального отзыва ведущей
организации на семинаре отдела прикладной гидродинамики
Института гидродинамики
9 марта 2016 г.

Руководитель семинара
чл.-корр. РАН



В.В. Пухначев