

УДК 532.68

ДИНАМИКА МИКРОСТРУЙ И НИТЕЙ СЛОЖНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

© 2011 г.

А.В. Базилевский, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

baz@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Представлено экспериментальное исследование некоторых течений неньютоновских жидкостей, а именно капиллярного распада струй и жидких мостиков (нитей) полимерных растворов. Особое внимание уделено разработке методов измерения упругих напряжений, возникающих в жидкости при ее элонгационном деформировании в потоке и являющихся причиной наблюдаемых гидродинамических эффектов.

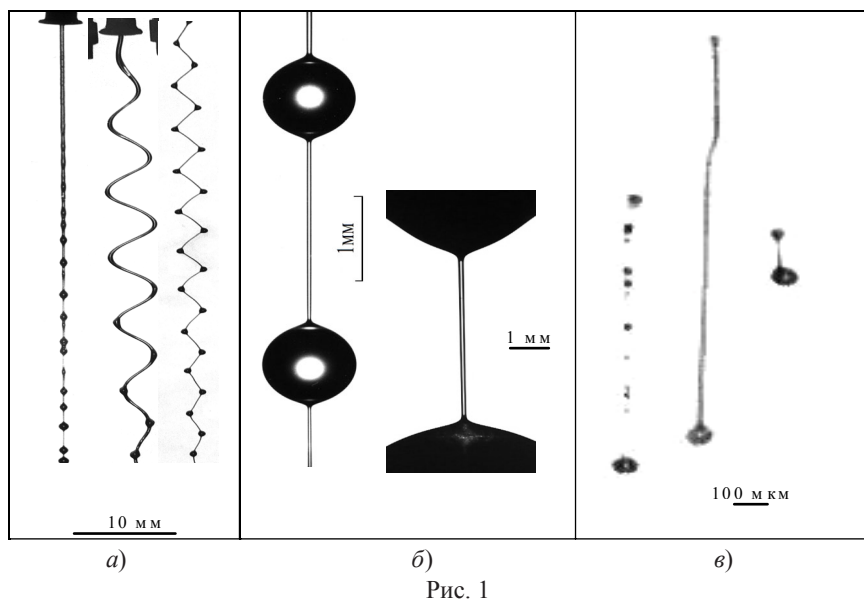
Ключевые слова: струя, нить, капля, жидкость, полимерный раствор, капиллярность, упругость, распад.

Неньютоновское поведение жидкостей является причиной ряда ярких гидродинамических эффектов, многие из которых имеют важное прикладное значение, например снижение турбулентного трения, увеличение эффективной вязкости воды при вытеснении нефти, стабилизация высокоскоростных макро- и микроструй, формирование нановолокна при электроспиннинге. Другие эффекты, не менее важные, представляют интерес для понимания фундаментальных аспектов течения жидкости со сложной реологией, а также могут быть использованы для оценки реологических свойств и косвенного суждения о перестройке структуры жидкости при ее течении или физико-химическом воздействии. К последнему классу относится эффект образования устойчивой нити при капиллярном распаде струи или растяжении капли жидкости. Большинство отмеченных гидродинамических эффектов – следствие упругих напряжений, возникающих в полимерной жидкости в ответ на ее преимущественно элонгационное деформирование. Так, например, упругие напряжения, возникающие при электроспиннинге полимерного раствора, подавляют рост осесимметричных возмущений поверхности микроструи, обеспечивая тем самым формирование однородного нановолокна. Поэтому необходимым условием реализации технологии электроспиннинга является точное соответствие между реологическими свойствами полимерного раствора и режимом его деформирования под действием электрических сил. Измерение напряжений является ключевым моментом для понимания механизмов течения неньютоновской жидкости. В связи с этим важен правильный выбор течений, допускающих, с одной стороны, достаточно простой теоретический анализ, а с другой – измерение всех

необходимых кинематических и динамических характеристик. В исследовании рассмотрен ряд таких течений, представлены методики анализа экспериментальных данных и полученные с их помощью результаты.

Одно из таких течений – распад капиллярной струи (рис. 1а, $v = 10$ м/с). Незначительные (0.01–0.1%) полимерные добавки существенно увеличивают длину гладкой части струи при высоких (> 3 м/с) скоростях истечения. Наблюдаемый эффект объясняется стабилизирующим действием осевого упругого натяжения струи, формирующегося в результате растяжения элементов жидкости в сходящемся течении в сопле, а затем релаксирующего в свободной струе. Для проверки этого механизма проведены прямые измерения осевого натяжения струи. На струю накладывались изгибные возмущения, а анализ формы огибающей поперечной волны позволил восстановить распределение натяжения вдоль оси струи и показать, что струя устойчива, пока ее натяжения выше уровня чисто капиллярного натяжения струи.

Другая серия экспериментов посвящена характерному для полимерных жидкостей гидродинамическому эффекту – образованию устойчивых самоутончающихся нитей. Такие нити образуются на поздней стадии распада струи (рис. 1б) или в результате растяжения одиночной капли между пластинами. Один из методов, позволяющих определить осевую силу натяжения нити непосредственно в движущейся струе, основан на описанных ранее экспериментах с колеблющимися струями. Было обнаружено, что при вытекании полимерного раствора из колеблющегося в поперечном направлении сопла волновой характер движения сохраняется и в области распада струи. В результате образуется необычный вариант тече-



ния жидкости – непрерывная зигзагообразная струя, переходящая в регулярную пилообразную структуру капель и нитей (см. рис. 1а). Траектория движения капли в зигзагообразной струе определяется только силами, действующими на нее со стороны пары примыкающих нитей, что позволяет извлекать информацию о силах натяжения нитей путем анализа формы зигзагообразной струи.

Еще один метод измерения силы натяжения капиллярных нитей основан на анализе формы капли, к которой примыкает нить. Аксиальная сила, действующая на каплю со стороны нити, вызывает деформацию капли. Степень отклонения формы капли от ее равновесной сферической формы пропорциональна силе натяжения примыкающей нити. В этом методе капля оказывается чувствительным датчиком сил, действующих в нити.

Другим примером являются импульсные микроструи (рис. 1в, время выброса – 100 мкс, $v =$

10 м/с). Изменяя реологию жидкости небольшими добавками полимеров, удастся кардинально изменить характер распада таких струй. В зависимости от молекулярных параметров полимера и его концентрации могут быть реализованы различные режимы распада импульсной струи – от незначительного подавления капиллярного распада на капли до полного его отсутствия и стягивания струи в одиночную каплю.

Таким образом, различные формы капиллярного распада струй, а также одиночная утончающаяся нить – эффективные инструменты для изучения гидродинамики сложных жидкостей. Полученные с их помощью результаты позволяют объяснить ряд аномалий течений этих жидкостей, которые важны для совершенствования таких технологий, как электроспиннинг и струйная печать, а также являются основой для новых методик и приборов для измерения реологических свойств жидкости в режиме растяжения.

DYNAMICS OF MICROJETS AND FILAMENTS OF COMPLEX FLUIDS

A.V. Bazilevsky, A.N. Rozhkov

An experimental investigation of certain flows of non-Newtonian fluids, namely, capillary breakup of jets and liquid bridges (filaments) of polymer solutions is presented. Special attention is given to the developing of methods for measuring elastic stresses in a fluid subjected to extension in a flow. These stresses are considered to be responsible for the hydrodynamic effects observed.

Keywords: jet, filament, drop, liquid, polymer solution, capillarity, elasticity, breakup.