

УДАР УПРУГОЙ КАПЛИ ПО ТОНКОМУ ЦИЛИНДРУ

© 2024 г. А. О. Руденко, А. Н. Рожков*

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук

119526 Москва, пр. Вернадского, 101

**e-mail: rozhkov@ipmnet.ru*

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 26.06.2024 г.

Принята в печать 10.07.2024 г.

Изучено столкновение капель упругих жидкостей и воды с тонким цилиндром (нитью). Упругими (неньютоновскими) жидкостями служили водные растворы полимеров, моделировавшие реологическое поведение ротовой жидкости — основного переносчика инфекций воздушно-капельным путем. Вода в качестве ньютоновской жидкости была исследована с целью выделения эффектов упругости при сравнении столкновения ньютоновских и неньютоновских жидкостей — воды и полимерных растворов. Траектория полета капель и ось цилиндра взаимно перпендикулярны. В экспериментах диаметр капли составлял 3 мм, а горизонтальных цилиндров из нержавеющей стали 0.4 и 0.8 мм. Формирование капель происходило путем медленного истечения жидкости из вертикального капилляра из нержавеющей стали с внешним диаметром 0.8 мм, от которого капли периодически отрывались под действием силы тяжести. Скорость капли перед столкновением определялась расстоянием между срезом капилляра и мишенью-цилиндром (в экспериментах это расстояние составляло 5, 10 и 20 мм). Скорость падения капель перед ударом оценивалась в диапазоне 0.2–0.5 м/с. Процесс столкновения зарегистрирован методом скоростной видеозаписи с частотой кадров 240 и 960 Гц. В испытаниях задействованы вода и водные растворы полиакриламида с молекулярной массой 11 млн и концентрацией 100 и 1000 млн⁻¹. Показано, что в зависимости от высоты падения капли и концентрации полимера возможны различные сценарии столкновения: кратковременный отскок капли от препятствия, торможение и остановка капли на препятствии, обтекание каплей цилиндрического препятствия с сохранением сплошности и продолжением свободного полета, а также распад капли на две вторичные капли, каждая из которых со своей историей последующего полета.

DOI: 10.31857/S2308112024030079, EDN: LWTEPJ

ВВЕДЕНИЕ

Защита от инфекций, передающихся воздушно-капельным путем, осуществляется за счет использования медицинских масок и фильтров, которые либо препятствуют, либо замедляют движение капель, возможных переносчиков инфекций. Патогенные капли образуются во время дыхания, разговора, кашля и чихания больного, попадая в организм здорового человека при вдыхании воздуха с содержанием таких капель [1–3]. Кроме того, крупные капли при столкновении с препятствиями [4–6], в том числе и с медицинскими масками, могут разрушаться на более мелкие, которые проще преодолевают средства защиты. Они также легче переносятся конвективными воздушными потоками, загрязняя территорию и пространство. В связи с чем, необходимо понимать механизмы столкновения капель упругой жидкости с материалом масок и фильтров. Поэтому экспериментально моделируется

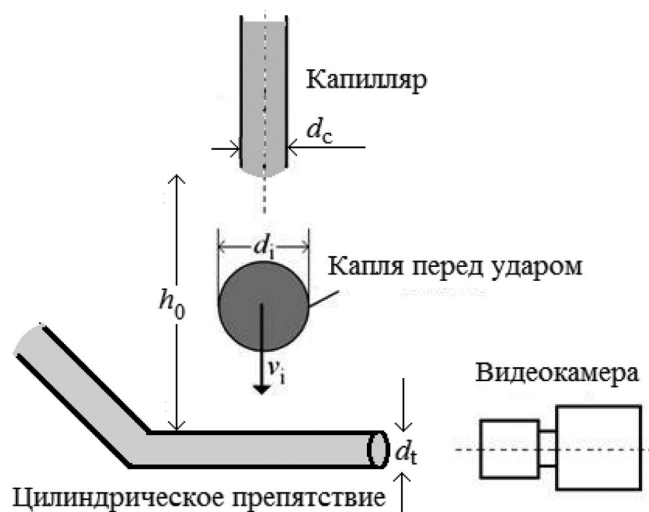
элементарный акт такого взаимодействия — падение капли на тонкий цилиндр, имитирующий волоконный компонент маски [7–10].

Результаты численного моделирования продемонстрировали наличие различных режимов обтекания тонкой нити каплей воды, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными [11, 12]. При скорости падения менее 1 м/с капли воды диаметром $d_i = 0.5$ мм, нить диаметром $d_f = 0.1$ мм способна задержать ее проникновение, т.е. капля удерживается вблизи нити за счет сил поверхностного натяжения.

В отличие от предыдущих экспериментов [7–12], в настоящей работе наряду с каплями ньютоновских жидкостей (для сравнения) в столкновениях участвуют капли неньютоновских вязкоупругих жидкостей, реология которых соответствует реальным ротовым и бронхиальным жидкостям [13–16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытаниям подвергали водные растворы полиакриламида молекулярной массой 11 млн с массовой долей 0, 100 и 1000 млн⁻¹ (ПАА-100, ПАА-1к). Растворы ПАА-100 и ПАА-1к применяли в качестве модельных жидкостей, имитирующих реальную ротовую жидкость. Действительно, данные растворы обладают реологическими параметрами (модулем упругости G и временем релаксации θ), которые максимально близки к соответствующим реологическим параметрам реальной ротовой жидкости $G = 0.11$ Па, $\theta = 0.33$ с (рис. 1, штриховые линии). Реологические параметры определяли методом утончающейся нити [13–16] в рамках реологических моделей “Oldroyd-B” и “Upper-Convected Maxwell” (UCM) [17, 18]. Как показано в работе [19], обе модели эквивалентны для



Первоначально капля жидкости образовывалась на конце капилляра, функцию которого выполняла инъекционная игла с внешним диаметром $d_c = 0.8$ мм. Жидкость медленно формировала каплю с помощью инфузионного насоса “SINO SN-50C6”. При достижении определенной массы капля отрывалась от капилляра [20]. Далее капля сталкивалась с поперечно расположенным цилиндрическим препятствием, которым служила другая инъекционная игла диаметром $d_c = 0.4$ или 0.8 мм. Для повышения контрастности и удаления из поля съемки посторонних объектов иглу согнули примерно под прямым углом так, чтобы на видеокдрах были видны только капля и торец иглы (см. схему и фото). В опытах расстояние от среза верхней иглы до боковой поверхности нижней иглы составляло $h_0 \sim 5, 10$ и 20 мм. Процесс столкновения регистрировали при помощи видеозаписи с частотой кадров $f = 240$ и 960 Гц. Смартфоны “iPhone 6” (240 Гц) и “Honor 30S (CDY-NX9A)” (960 Гц) применяли для видеозаписи.

случаев больших упругих деформаций, характерных для исследуемых здесь течений. Результаты реологических испытаний модельных и реальных жидкостей и их сопоставление представлены на рис. 1. Оказалось, что наилучшее приближение обеспечивают растворы ПАА из диапазона концентрации $c \sim 252\text{--}2102$ млн⁻¹ (а также растворы полиэтиленоксида концентрации $c \sim 12449\text{--}19320$ млн⁻¹). Используемые в настоящем исследовании рабочие жидкости ПАА-100 и ПАА-1к характеризовались реологическими параметрами $G = 89.5 \pm 2.7$ мПа, $\theta = 27.3 \pm 6.0$ мс и $G = 139.1 \pm 4.3$ мПа, $\theta = 198.5 \pm 46.5$ мс соответственно [15]. Добавки ПАА не меняют заметно поверхностное натяжение растворов, которое остается примерно таким же, как и воды $\gamma = 72.6$ мН/м [15].

Ниже представлена схема ударного эксперимента и фото экспериментальной установки:



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе обработки видеок кадров был установлен диаметр капли перед ударом $d_i \sim 3$ мм и оценена ее масса $m_0 = (\pi/6) \rho d_i^3 = 14$ мкг (ρ – плотность жидкости). Скорость капли в момент соприкосновения с препятствием определена как $v_i \sim 0.2011, 0.2736$ и 0.4931 м/с для высот падения $h_0 \sim 5, 10$ и 20 мм соответственно (рис. 2).

Произведенные видеозаписи позволяют также проследить все фазы столкновения (рис. 3–5). Наблюдаемые процессы и особенности столкновения капли с препятствием сведены в табл. 1. Прослеживается несколько возможных сценариев столкновения, детали которых указаны в табл. 1. В частности, в случае воды при малых высотах падения $h_0 \sim 5$ мм видны отскоки каплей от цилиндрического препятствия при их соприкосновении и последующие отрывы каплей от препятствия (рис. 3а, 3б). Ранее отскоки каплей происходили при ударе каплей о плоскую

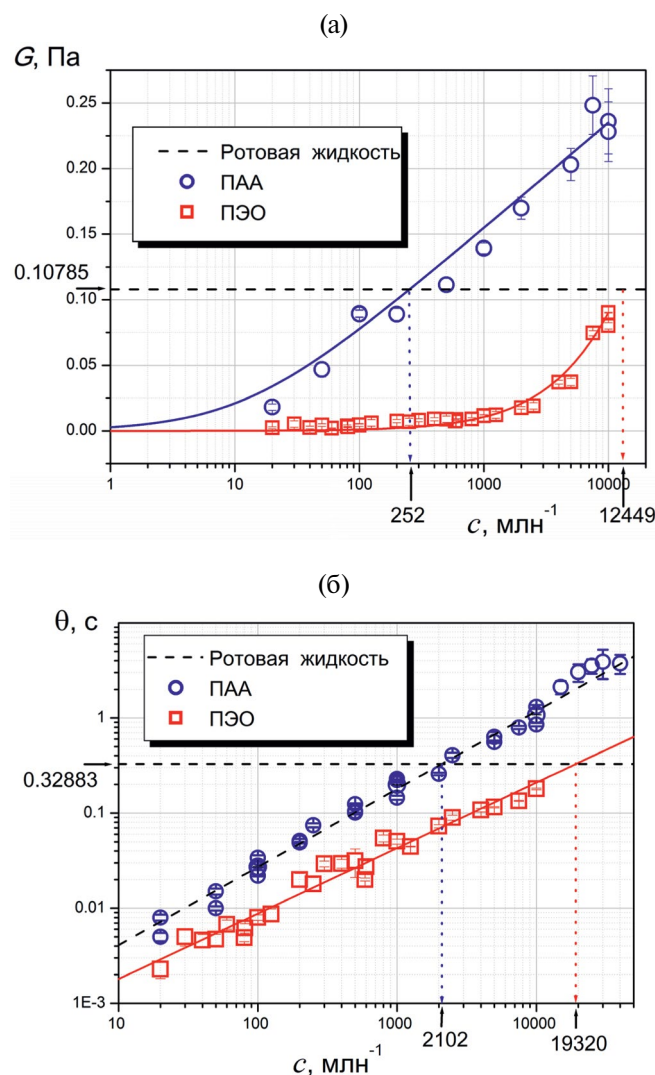


Рис. 1. Выбор концентрации модельных растворов ПАА и ПЭО, имитирующих реологическое поведение реальной ротовой жидкости, путем сопоставления результатов тестов модельных (кружки, квадраты) [15] и реальной ротовой жидкости (штриховые линии) [16]. Цветные рисунки можно посмотреть в электронной версии.

поверхность, например, как в работе [21]. При больших высотах падения $h_0 \sim 10$ и 20 мм отскок не столь явно заметен (рис. 3в–3е), зато при столкновении с наиболее толстым препятствием $d_i = 0.8$ мм при $h_0 \sim 10$ мм происходит распад падающей капли на две капли, одна из которых отрывается, а другая остается на препятствии, но позже может быть оторвана от препятствия ударом третьей капли (рис. 3г), а при $h_0 \sim 20$ мм разделение падающей капли на две завершается их коалесценцией и последующим отрывом (рис. 3е).

В случае слабokonцентрированных растворов ПАА-100 видны отскоки, захваты и отрывы капель при высоте падения $h_0 \sim 5$ –20 мм (рис. 4). Столкновение без захвата и частичный захват наблюдались

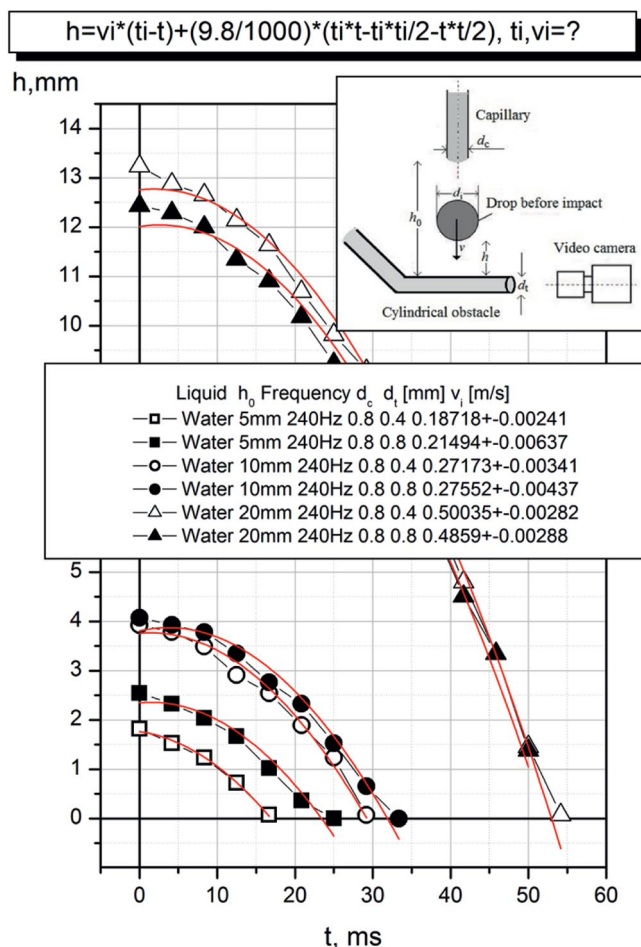


Рис. 2. Зависимость изменения расстояния от капли воды до препятствия h во времени t для разных расстояний между иглами h_0 . Точкам соответствуют приведенные значения высоты падения капли и диаметра игл d_c, d_i . Зависимость аппроксимировалась уравнением свободного падения, из которого вытекает расчетная формула, показанная на графике. В рамках пакета "Origin 6.1" находились значения t_i – время падения капли и $v_i \pm \Delta v_i$ – скорость удара и точность ее определения. Столкновения происходили при скорости 0.2–0.5 м/с.

только в случаях $h_0 \sim 5$ мм при $d_i = 0.4$ мм (рис. 4а) и $h_0 \sim 20$ мм при $d_i = 0.4$ мм (рис. 4д). В остальных случаях отрыв захваченной капли обеспечивается ударом следующей капли.

Во всех случаях концентрированных растворов ПАА-1к прослеживается захват, и отрыв захваченной капли возможен лишь ударом следующей капли или капель (рис. 5).

На рис. 6 показана карта столкновений. Видно, что в случае воды большинство столкновений заканчивается отрывом капель от препятствия, за исключением одного случая из шести, когда капля разделилась на две, и одна часть не смогла оторваться от препятствия (рис. 3г). Для полимерного раствора ПАА-100, наоборот,

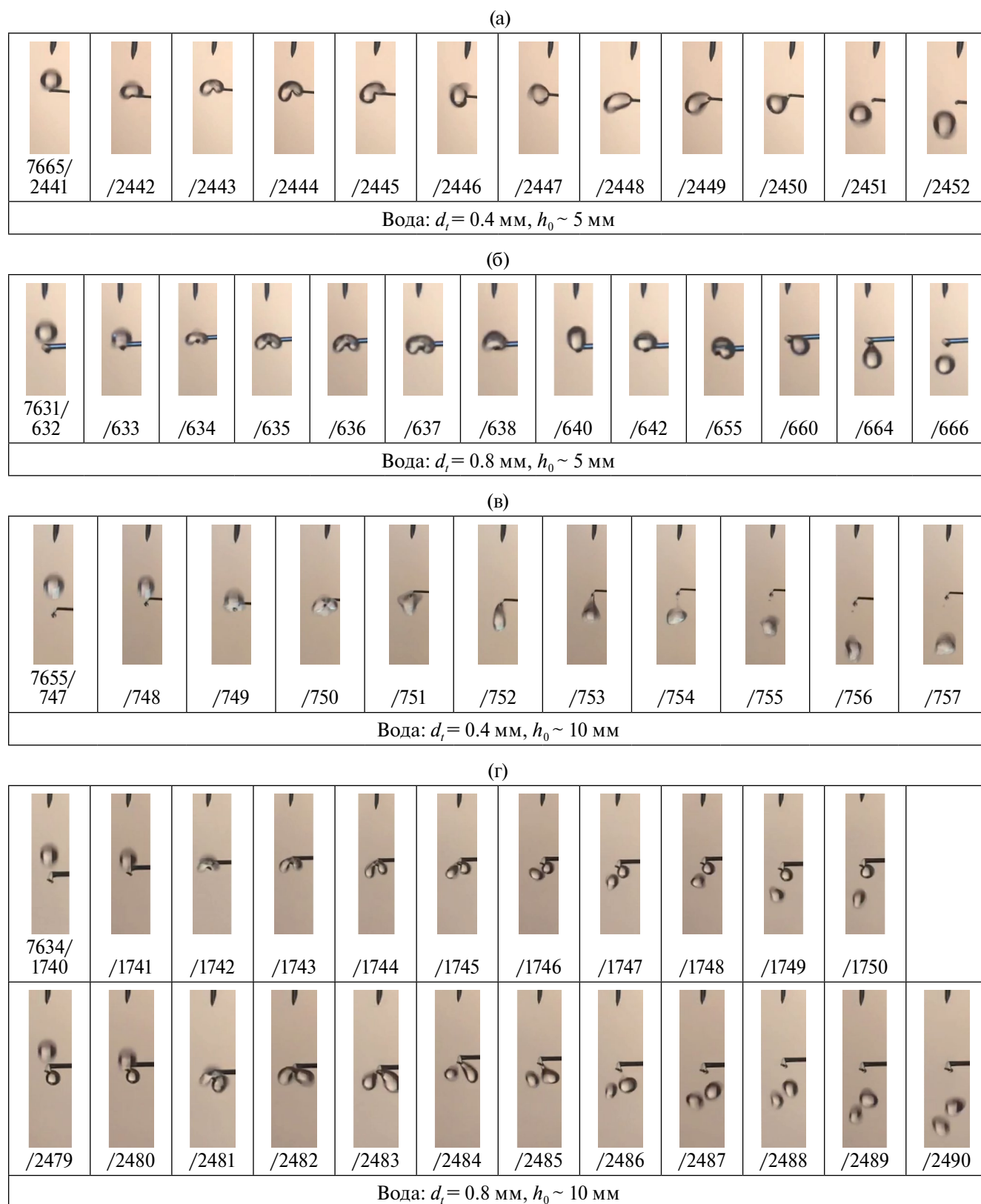


Рис. 3. (начало) Столкновение капли воды с препятствием ($d_c = 0.8$ мм, $d_i = 2.84$ мм, $f = 240$ Гц) при разных значениях d_i и h_0 : а, б — отскок и отрыв капли воды от препятствия при $d_i = 0.4$ и 0.8 мм соответственно, $h_0 \sim 5$ мм; в — отрыв капли воды от препятствия при $d_i = 0.4$ мм и $h_0 \sim 10$ мм; г — распад капли воды на две части, захват препятствием одной и отрыв другой, последующий отрыв оставшейся капли под действием удара следующей каплей при $d_i = 0.8$ мм и $h_0 \sim 10$ мм. Здесь и на рис. 4, 5 цифры под кадрами — номер видеозаписи и порядок кадров в ней.

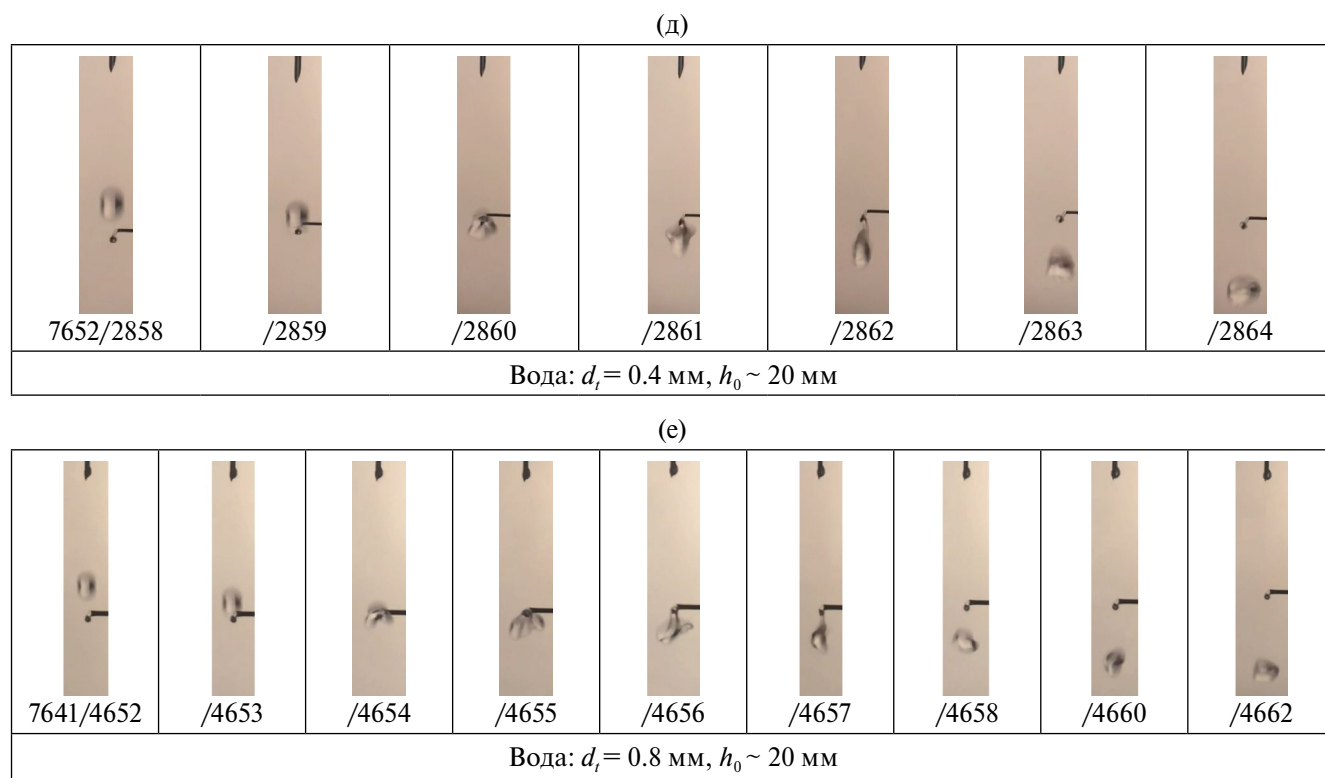


Рис. 3. (окончание) Столкновение капли воды с препятствием ($d_i = 0.8$ мм, $d_i = 2.84$ мм, $f = 240$ Гц) при разных значениях d_i и h_0 : д – отрыв капли воды от препятствия при $d_i = 0.4$ мм и $h_0 \sim 20$ мм; е – разрыв капли воды на две части, их коалесценция и последующий отрыв объединенной капли от препятствия при $d_i = 0.8$ мм и $h_0 \sim 20$ мм. Здесь и на рис. 4, 5 цифры под кадрами – номер видеозаписи и порядок кадров в ней.

в большинстве случаев наблюдается захват каплей препятствием, и лишь иногда, в двух случаях из шести (рис. 4а и 4д), столкновение протекает с частичным отрывом жидкости от препятствия. Все столкновения капель концентрированных растворов ПАА-1к завершаются захватом каплей препятствием.

В целом, для всех жидкостей существенного влияния диаметра цилиндрической мишени не обнаружено, так же как и влияния скорости удара.

При столкновении капли с препятствием доминирующими факторами являются силы инерции, капиллярности, упругости и гравитации. Соотношения этих сил описываются безразмерными числами Вебера – $We_i = \rho v_i^2 d_i / \gamma$, Фруда – $Fr_i = v_i / (g d_i)^{1/2}$ и параметром упругости $B = \pi d_i G \theta^2 / (4 m_0)$, где g – ускорение свободного падения. Соответствующие значения представлены в табл. 1. Задержится капля на препятствии (захват) или оторвется от него (отрыв) зависит от соотношения этих сил. В работе [22] теоретически и экспериментально изучен процесс метания микрокапли упругой жидкости из сопла печатающей головки струйного принтера. Процесс во многом аналогичен явлению, исследуемому здесь. В обоих случаях движение капли

происходит по инерции, накопленной каплей в момент отрыва от сопла или препятствия, а далее движение тормозится силами упругости и капиллярности и может ускориться гравитацией. Как показано в работе [22] и в настоящей работе, при малых значениях концентрации добавок полимера капля легко отрывается, а при доминировании упругости над всеми прочими факторами капля захватывается препятствием, останавливает свой полет и(или) возвращается к печатающей головке, если рассматривается метание струи из сопла.

Критерием остановки (захвата) капли считается условие [22]

$$B = \pi d_i G \theta^2 / (4 m_0) \geq 1.45, \quad (1)$$

так как в противном случае капля отрывается от препятствия (сопла).

На рис. 6 можно видеть, как режим метания (столкновения) зависит от упругости жидкости (параметр B) и высоты падения капли h_0 (скорости метания). Прослеживается явная тенденция перехода к упругому режиму с захватом капли при росте параметра упругости B , как показывает нам формула (1). Вместе с тем, высота падения

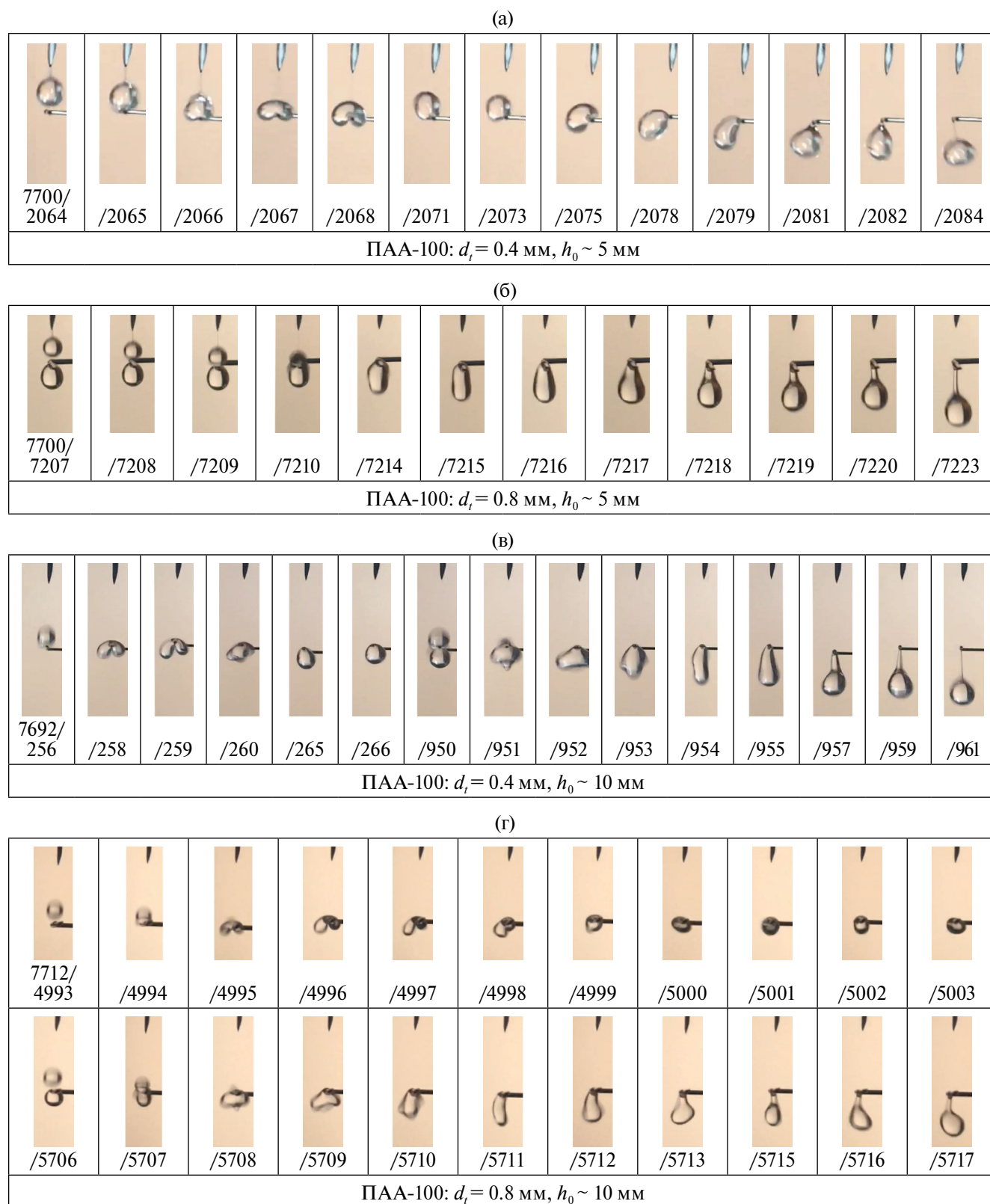


Рис. 4. (начало) Столкновение капли ПАА-100 с препятствием ($d_c = 0.8$ мм, $d_i = 2.84$ мм, $f = 240$ Гц) при разных значениях d_i и h_0 : а – отскок и отрыв капли ПАА-100 от препятствия при $d_i = 0.4$ мм и $h_0 \sim 5$ мм; б – захват первой капли ПАА-100 препятствием и последующий отрыв от него ударом следующей капли при $d_i = 0.8$ мм и $h_0 \sim 5$ мм; в, г – отскок и захват капли ПАА-100 препятствием и ее отрыв ударом следующей капли при $d_i = 0.4$ и 0.8 мм соответственно, $h_0 \sim 10$ мм.

Здесь и на рис. 5 линейки на кадрах показывают масштаб изображения.

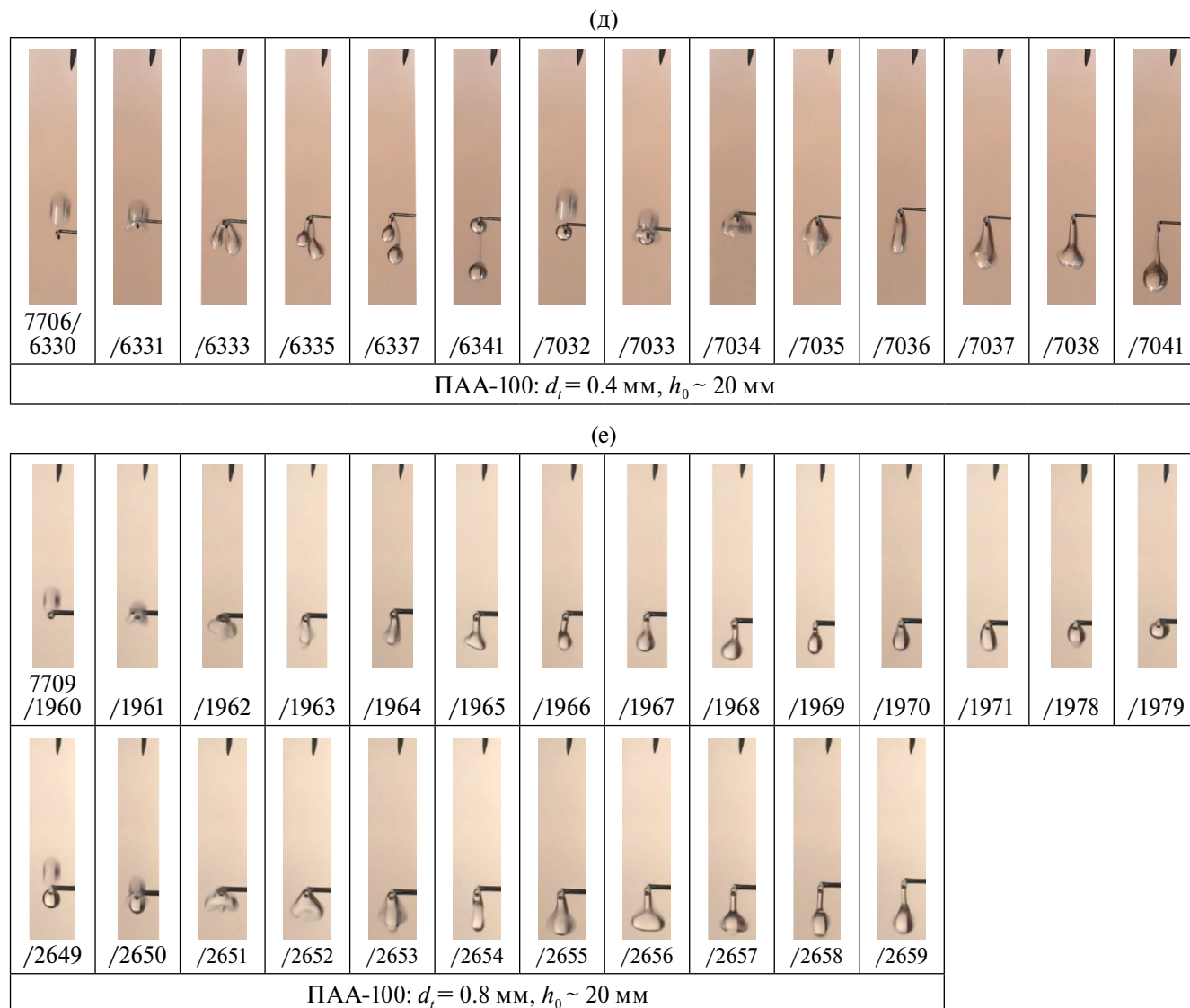


Рис. 4. Столкновение капли ПАА-100 с препятствием ($d_c = 0.8$ мм, $d_t = 2.84$ мм, $f = 240$ Гц) при разных значениях d_t и h_0 : а – отскок и отрыв капли ПАА-100 от препятствия при $d_t = 0.4$ мм и $h_0 \sim 5$ мм; б – захват первой капли ПАА-100 препятствием и последующий отрыв от него ударом следующей капли при $d_t = 0.8$ мм и $h_0 \sim 5$ мм; в, г – отскок и захват капли ПАА-100 препятствием и ее отрыв ударом следующей капли при $d_t = 0.4$ и 0.8 мм соответственно, $h_0 \sim 10$ мм; д – распад капли ПАА-100 на две части (одна отрывается, а другая – остается) и последующий отрыв от препятствия захваченной капли ударом следующей капли при $d_t = 0.4$ мм и $h_0 \sim 20$ мм; е – провисание, захват капли ПАА-100 препятствием, последующий отрыв захваченной капли ударом следующей капли при $d_t = 0.8$ мм и $h_0 \sim 20$ мм. Здесь и на рис. 5 линейки на кадрах показывают масштаб изображения.

h_0 (т.е. скорость удара) практически не влияет на режим столкновения. Это наблюдение согласуется с предсказанием формулы (1), в которой отсутствует скорость удара v_i .

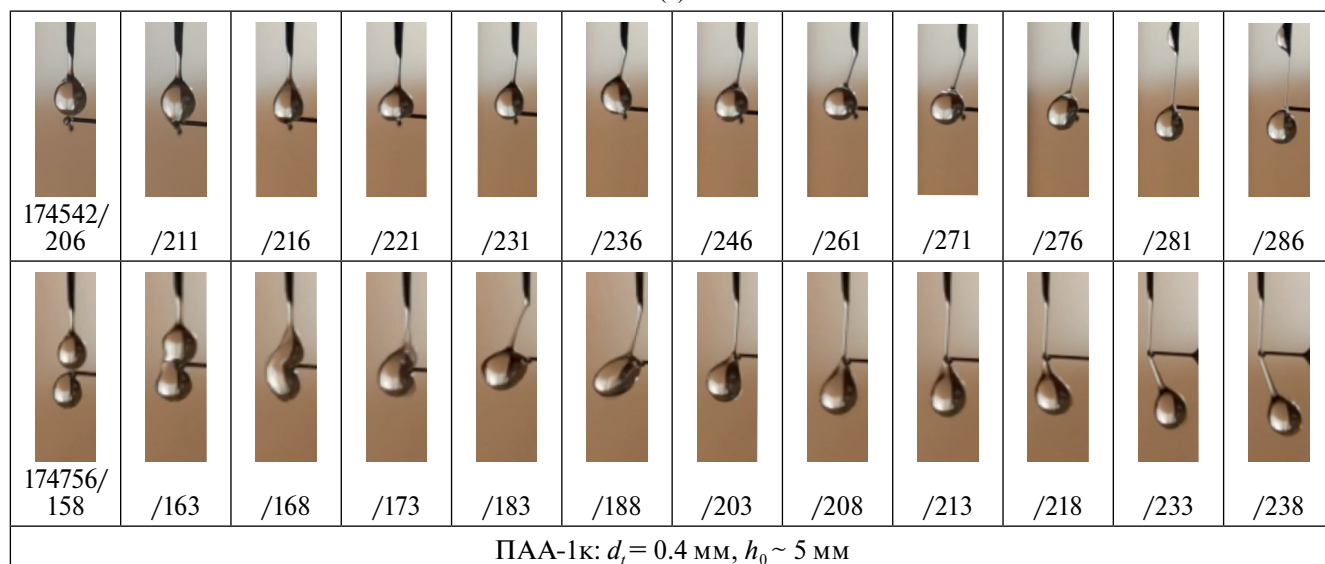
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение ударов капель воды и полимерных жидкостей показало, что возможны различные сценарии взаимодействия падающей капли с тонким цилиндром, которые зависят от кинематики удара и реологических свойств жидкости. Установлено, что упругость жидкости,

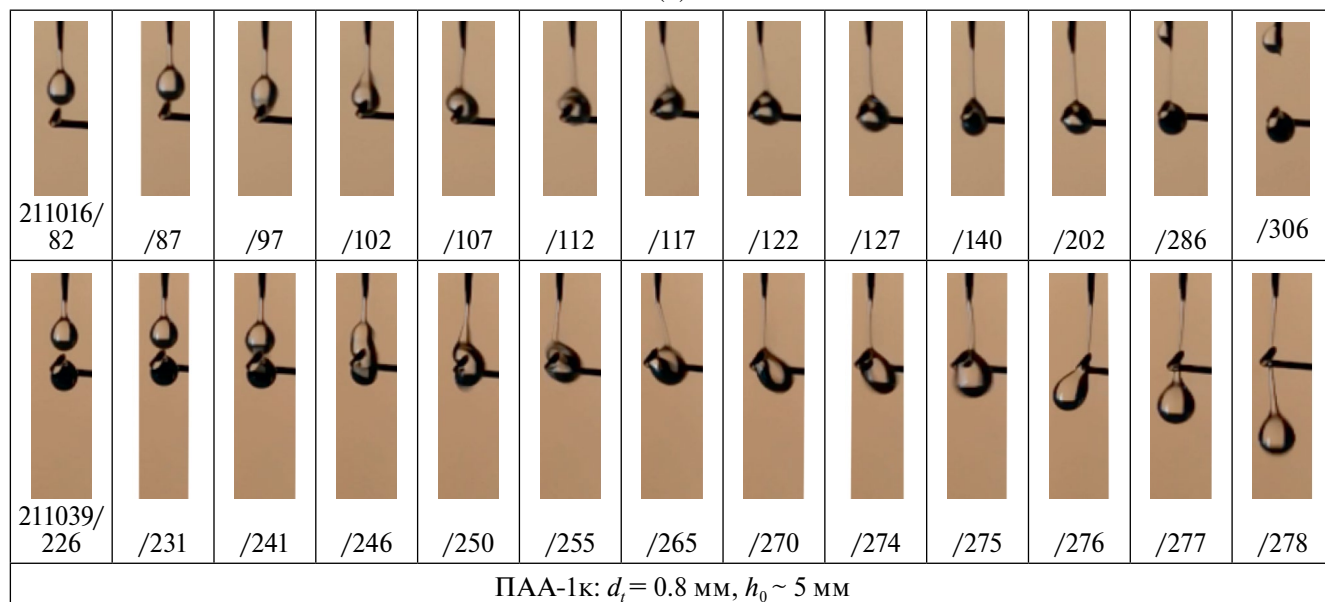
увеличивающаяся с концентрацией полимера, способствует захвату капель тонким цилиндром. Отрыв капли в этом случае обеспечивается дополнительными ударами следующих капель. Эксперименты также выявили ситуацию отскока капель от тонкого цилиндра, причем наблюдается она как для воды, так и для полимерных жидкостей. Кроме того, в экспериментах было обнаружено, что при определенных обстоятельствах происходит распад капли на две, причем дальнейшая судьба этих капель может быть разной.

В целом, работа показала, что именно упругость ротовой жидкости затрудняет передачу

(a)



(б)



(в)

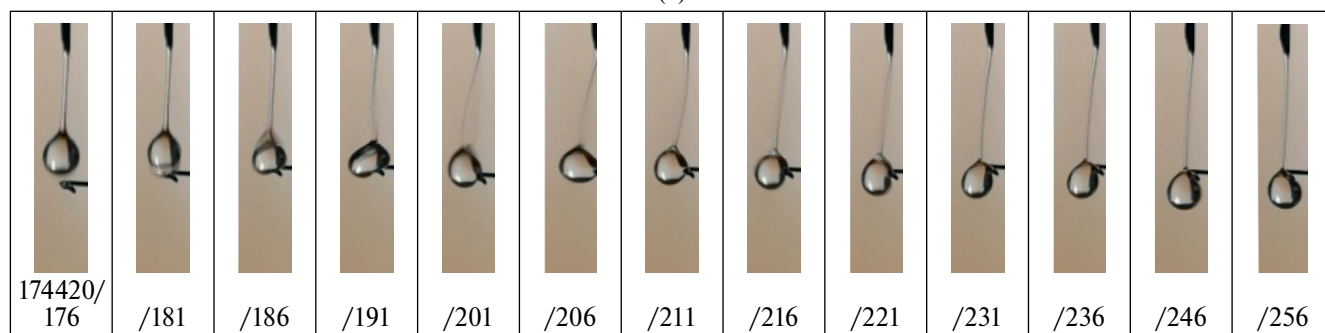
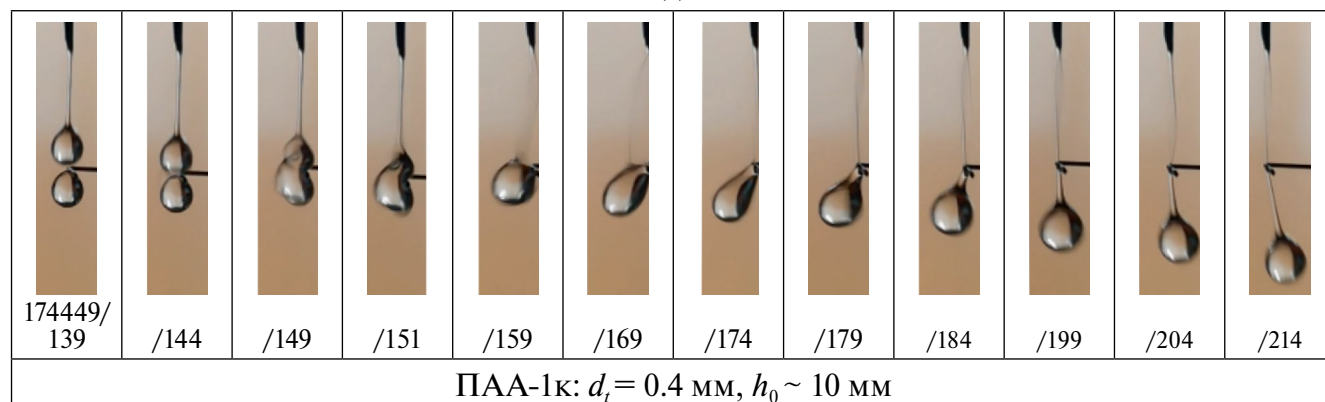
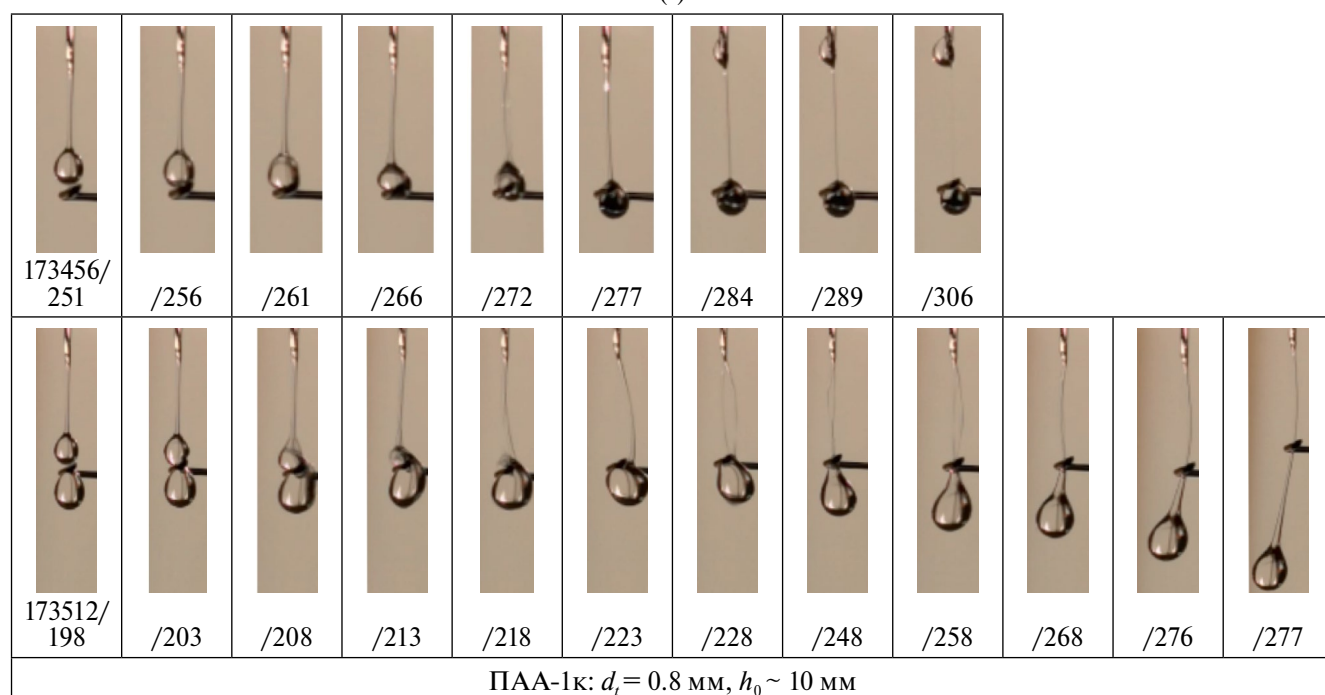


Рис. 5. (начало) Столкновение капли ПАА-1к с препятствием ($d_c = 0.8$ мм, $d_i = 2.86$ мм, $f = 960$ Гц) при разных значениях d_i и h_0 : а, б – захват капли ПАА-1к препятствием и ее отрыв ударом следующей капли с провисанием при $d_i = 0.4$ и 0.8 мм соответственно, $h_0 \sim 5$ мм; в – захват капли ПАА-1к препятствием и ее отрыв ударом следующей капли с провисанием при $d_i = 0.4$ и 0.8 мм соответственно, $h_0 \sim 10$ мм.

(в)



(г)



(д)

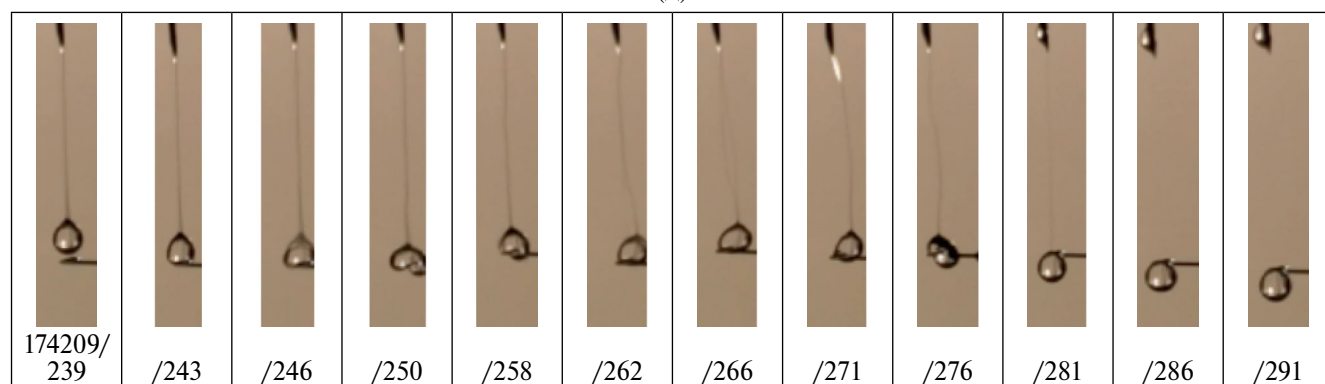
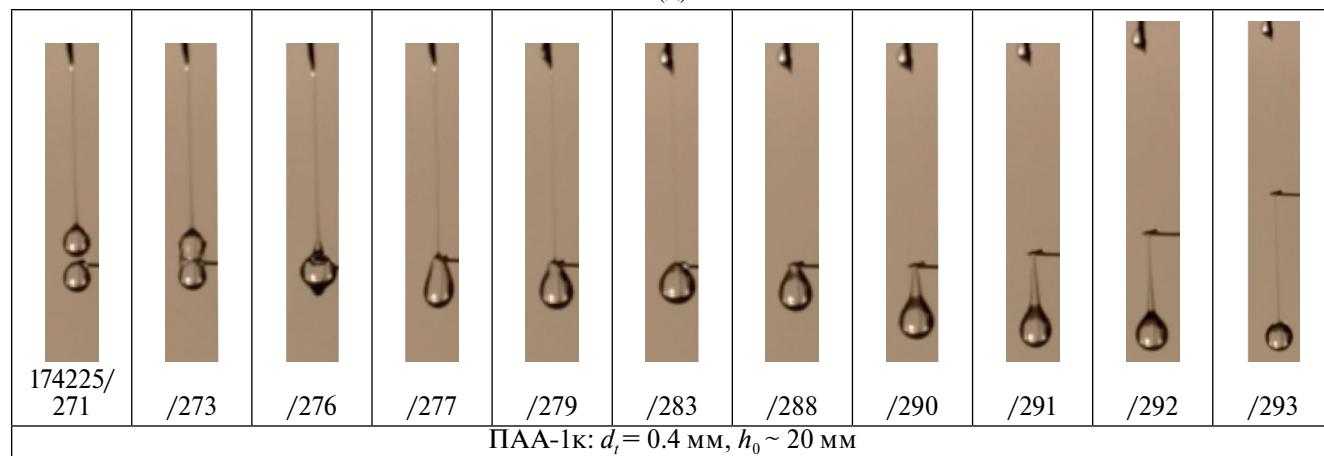


Рис. 5. (продолжение) Столкновение капли ПАА-1к с препятствием ($d_e = 0.8$ мм, $d_i = 2.86$ мм, $f = 960$ Гц) при разных значениях d_i и h_0 : в, г – захват капли ПАА-1к препятствием и ее отрыв ударом следующей капли с провисанием при $d_i = 0.4$ и 0.8 мм соответственно, $h_0 \sim 10$ мм; д – захват капли ПАА-1к препятствием, отскок и ее отрыв ударом следующей капли при $d_i = 0.4$ мм и $h_0 \sim 20$ мм.

(д)



(е)

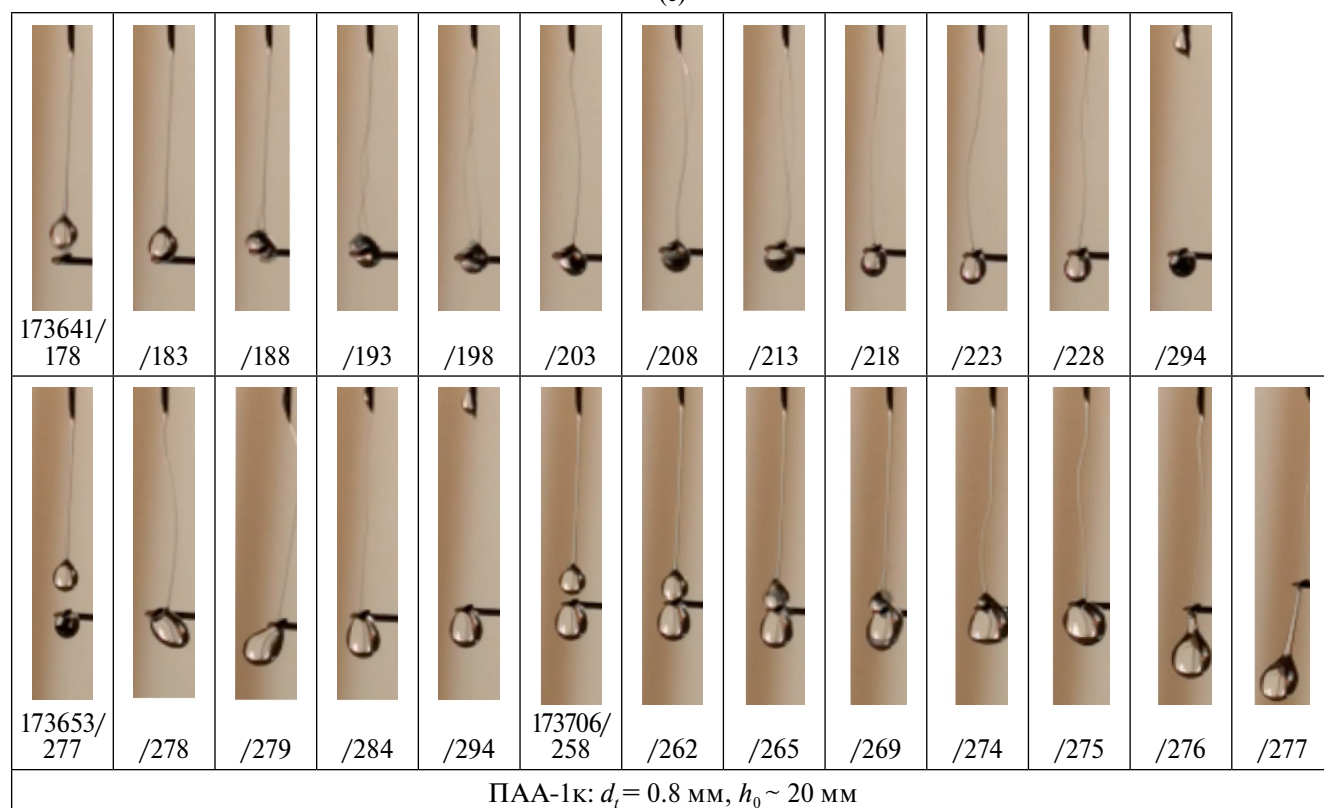


Рис. 5. (окончание) Столкновение капли ПАА-1к с препятствием ($d_c = 0.8$ мм, $d_i = 2.86$ мм, $f = 960$ Гц) при разных значениях d_i и h_0 : д – захват капли ПАА-1к препятствием, отскок и ее отрыв ударом следующей капли при $d_i = 0.4$ мм и $h_0 \sim 20$ мм; е – захват первой и второй капель ПАА-1к препятствием (капля увеличивается в размере) и ее отрыв от препятствия ударом третьей капли с провисанием при $d_i = 0.8$ мм и $h_0 \sim 20$ мм.

инфекции при использовании медицинских масок и защищает нас от заболеваний, передаваемых воздушно-капельным путем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №23-19-00451).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dbouk T., Drikakis D.* // Phys. Fluids. 2020. V. 32. P. 053310.
2. *Bourouiba L., Dehandschoewercker E., Bush J.W.M.* // J. Fluid Mech. 2014. V. 745. P. 537.
3. *Bourouiba L.* // Ann. Rev. Biomed. Eng. 2021. V. 23. P. 547.

Таблица 1. Процессы и особенности столкновения капли воды, ПАА-100 и ПАА-1к с препятствием при заданных параметрах

Образец	$h_0 \sim 5 \text{ мм},$ $d_c = 0.8 \text{ мм}$ ($Fr_i = 1.1726,$ $We_i = 1.6711$)		$h_0 \sim 10 \text{ мм},$ $d_c = 0.8 \text{ мм}$ ($Fr_i = 1.5958,$ $We_i = 3.0933$)		$h_0 \sim 20 \text{ мм},$ $d_c = 0.8 \text{ мм}$ ($Fr_i = 2.8760,$ $We_i = 10.047$)	
	$d_t = 0.4 \text{ мм}$	$d_t = 0.8 \text{ мм}$	$d_t = 0.4 \text{ мм}$	$d_t = 0.8 \text{ мм}$	$d_t = 0.4 \text{ мм}$	$d_t = 0.8 \text{ мм}$
Вода ($B = 0$)	Отскок и отрыв капли	Отскок и отрыв капли	Отрыв капли	Распад капли на две части, захват одной и отрыв другой части, а также отрыв оставшейся капли следующей каплей	Отрыв капли	Разрыв капли на две части, коалесценция и отрыв
ПАА-100 ($G = 89.5 \pm \pm 2.7 \text{ мПа},$ $\theta = 27.3 \pm \pm 6.0 \text{ мс},$ $B = 0.0112$)	Отскок и отрыв капли	Захват и отрыв ударом следующей каплей	Отскок, захват и отрыв следующей каплей	Отскок, захват и отрыв следующей каплей	Распад капли на две части, захват одной и отрыв другой, и последующий отрыв ударом следующей каплей	Провисание капли, захват и отрыв следующей каплей
ПАА-1к ($G = 139.1 \pm \pm 4.3 \text{ мПа},$ $\theta = 198.5 \pm \pm 46.5 \text{ мс},$ $B = 0.9224$)	Захват, отрыв следующей каплей с провисанием	Захват, отрыв следующей каплей с провисанием	Захват, отрыв следующей каплей с провисанием	Захват, отрыв следующей каплей с провисанием	Отскок, захват, отрыв следующей каплей с провисанием	Захват, отрыв третьей каплей с провисанием

Примечание. Показатели таблицы согласуются с данными рис. 3–5 соответственно.

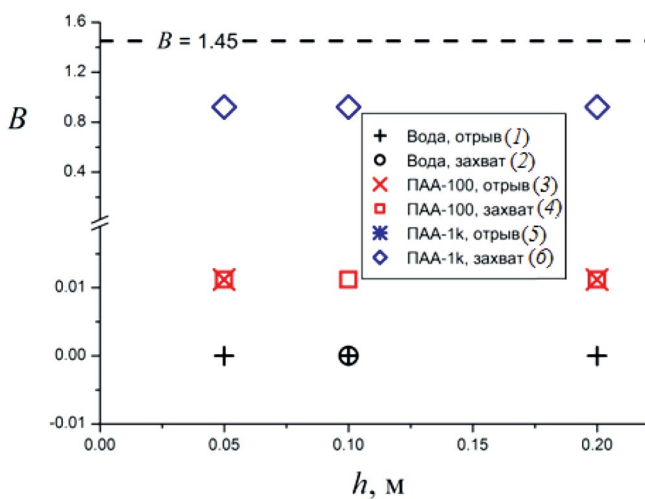


Рис. 6. Режимы столкновения отрыв (1, 3, 5) и захват (2, 4, 6) как функция высоты падения капли h и параметра упругости B : 1, 2 – вода; 3, 4 – ПАА-100; 5, 6 – ПАА-1к. Уровень $B = 1.45$ показывает приближительную теоретическую границу перехода к разрушению капли при столкновении с цилиндрическим препятствием.

4. Lorenceau É., Quéré D. // J. Coll. Int. Sci. 2003. V. 263. P. 244.

5. Villiermaux E., Bossa B. // J. Fluid Mech. 2011. V. 668. P. 412.

6. Rozhkov A., Prunet-Foch B., Fedyushkin A., Vignes-Adler M. // Atomiz. Sprays. 2023. V. 33. № 10. P. 1.

7. Lorenceau E., Clanet C., Quere D. // J. Coll. Int. Sci. 2004. V. 279. P. 192.

8. Dressaire E., Sauret A., Boulogne F., Stone H.A. // Soft Matter. 2016. V. 12. № 1. P. 200.

9. Kim S., Kim W. // Phys. Fluids. 2016. V. 28. P. 042001.

10. Bazilevsky A.V. Rozhkov A.N. // Fluid Dynamics. 2023. V. 58. № 5. P. 934.

11. Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N., Rudenko A.O. // J. Phys.: Conference Series. 2021. V. 2057. P. 012034.

12. Федюшкин А.И., Гневушев А.А., Захаров А.С., Рожков А.Н. // Матер. XXIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам

- (ВМСППС'2023), 4–10 сентября 2023 г., Дивно-морское, Краснодарский край. С. 440.
13. *Bazilevsky A.V., Entov V.M., Rozhkov A.N.* // Fluid Dynamics. 2011. V. 46. № 4. P. 613.
 14. *Subbotin A.V., Malkin A.Y., Kulichikhin V.G.* // Adv. Coll. Int. Sci. 2011. V. 162. № 1–2. P. 29.
 15. *Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M.* // J. Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2015. V. 226. P. 46.
 16. *Rozhkov A.N.* // Russ. J. Biomech. 2021. V. 25. № 4. P. 338.
 17. *Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager O.* Dynamics of Polymeric Liquids. New York: Wiley, 1987.
 18. *Astarita G., Marrucci G.* Principles of Non-Newtonian Fluid Mechanics. London: McGraw Hill, 1974.
 19. *Bazilevskii A.V., Rozhkov A.N.* // Polymer Science A. 2018. V. 60. № 3. P. 391.
 20. *Adamson A.W.* Physical Chemistry of Surfaces. New York: Wiley, 1976.
 21. *Antonini C., Villa F., Bernagozzi I., Amirfazli A., Marengo M.* // Langmuir. 2013. V. 29. № 52. P. 16045.
 22. *Bazilevskii A.V., Meyer J.D., Rozhkov A.N.* // Fluid Dynamics. 2005. V. 40. № 3. P. 376.