

СКОРОСТЬ ПОДНЯТИЯ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДЕ И ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

А. Городецкая

Прохождение пузырьков газа или пара через жидкость имеет место во многих технических процессах.

Обычно пузырьки имеют такие размеры, что сопротивление движению их носит турбулентный характер.

Бонд и Ньютон [1] проверяли применимость закона Стокса к пузырькам. Найденная ими граница применимости закона Стокса, «критический радиус» пузырька имеет чрезмерно большую величину. Аллен [2] провел экспериментальную проверку с пузырьками малых размеров, показавшую применимость закона Стокса до чисел Рейнольдса $Re=1$. Для пузырьков же больших размеров до $Re=4$ в уравнение Стокса вводится поправка Озеена и Гольдштейна [3]. Для больших значений Re Аллен вывел эмпирическую формулу, по которой скорость подъема пузырька линейно зависит от его радиуса. Мияги [4] нашел, что для пузырьков в воде эта линейная зависимость распространяется до размера пузырьков 2,4 мм.

Более поздние работы [5] основаны на уже упомянутых работах и потому не вносят ничего существенно нового в теорию вопроса.

Теоретическое исследование турбулентного сопротивления движению пузырьков газа было проведено В. Левичем [6] для больших чисел Рейнольдса. Как известно, в случае твердого шарика область турбулентности захватывает почти половину сферы, соответствующую кормовой части падающего шарика. В. Левич показал, что в отличие от этого при движении пузырька газа область турбулентности занимает лишь очень узкое пространство у кильватера пузырька, вследствие чего скорость движения пузырька газа должна быть значительно больше скорости падения твердого шарика того же размера (конечно, при учете соответствующих разностей плотностей).

Выведенные Левичем соотношения справедливы только для недеформированных пузырьков, вследствие чего верхний предел применимости теории ограничен значениями числа $Re \cong 1500$, нижний же предел примыкает непосредственно к стоксовской области.

Между тем экспериментальные данные для пузырьков соответствующих размеров дают скорости в 1,5—2 раза меньшие, чем этого требует теория. На рис. 1 приведена теоретическая кривая зависимости скорости подъема пузырька в воде от его диаметра, вычисленная по выведенному Левичем уравнению:

$$V = \frac{1}{9} \frac{R^2 g (\rho - \rho')}{\mu},$$

где V — скорость подъема пузырька,

R — радиус пузырька,

g — ускорение силы тяжести,

ρ, ρ' — соответственно плотности жидкости и газа,

μ — вязкость жидкости (в нашем случае воды).

На этом же рис. для сравнения приводятся экспериментальные кривые, полученные различными авторами [2], [7]. Как и на остальных рисунках, по оси абсцисс отложены радиусы пузырьков в миллиметрах, а по оси ординат — скорость подъема в см/сек.

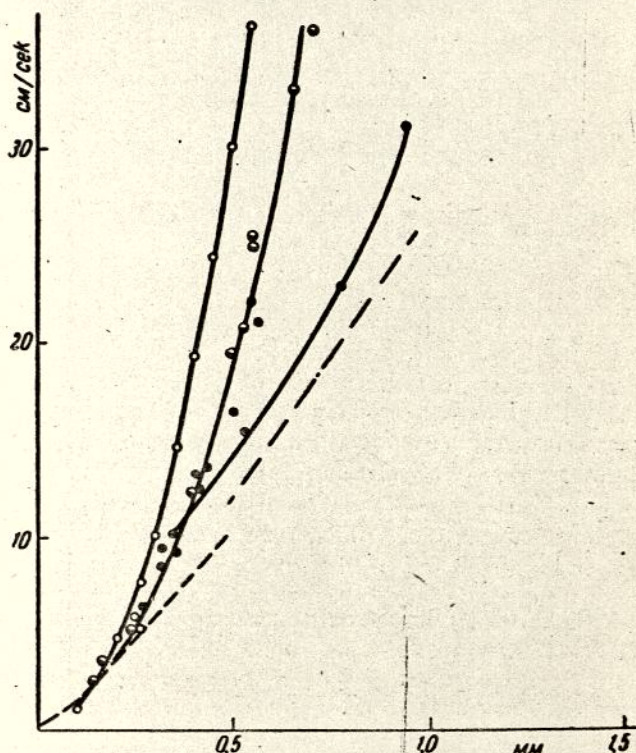


Рис. 1. Измерения в воде: $\circ$ — теоретич. кривая Левича; — — — кривая Аллена (эксперим.); — · — кривая Шабалина (эксперим.); $\odot$ — кривая Люксингера (эксперим.); $\bullet$ — дважды перегнанная вода (визуальные наблюдения); $\bullet$ — дважды перегнанная вода (киносъемки)

Согласно теории, развитой ранее Фрумкинм и Левичем [8] для жидких капель и подтвержденной опытами Крюковой и Багоцкой [9], поверхностно-активные вещества, адсорбируясь на капле, препятствуют тангенциальным движениям ее поверхности, вследствие чего скорость падения капли может уменьшаться до скорости падения твердой сферы. Исходя из этого, можно было предполагать, что присутствие поверхностно-активных веществ должно оказывать влияние и на скорость подъема пузырьков газа и что это влияние не было исключено в указанных выше опытах.

Целью настоящей работы является проверка теории Левича, а также исследование влияния поверхностно-активных веществ на скорость подъема пузырьков газа.

Экспериментальная часть

Для измерения скорости поднятия пузырька вначале мы употребляли вертикально расположенную стеклянную трубку 1,5 м высоты и 5 см в диаметре. В нижнюю часть трубки вставлялся на плифе вертикально расположенный капилляр, диаметром 0,3 мм для маленьких пузырьков и 0,7 мм — для больших, соединенный с небольшим резервуаром, заполненным тем же раствором, что и вся трубка.

В капилляр заранее набиралось несколько пузырьков воздуха и измерялся их размер с помощью горизонтального микроскопа, снабженного окулярмикрометром, после чего нагреванием резервуара пузырьки по одному выпускались в вертикальную трубку и с помощью секундомера измерялось время поднятия их до определенной метки на трубке. Опыты проводились при 21° , причем во избежание таяния пузырька вода или раствор заранее насыщались воздухом при этой температуре. Результаты, полученные таким способом, приведены на рис. 2.

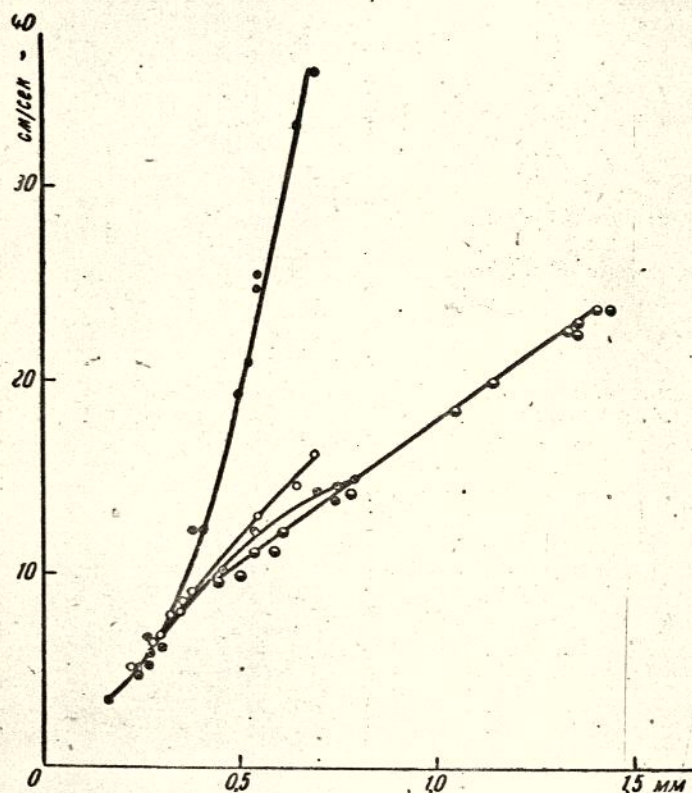


Рис. 2. Визуальные наблюдения: ● — дважды перегнанная вода; ○ — водопроводная вода; ◐ — n-амиловый спирт 10^{-4} М; ● — стеклянные шарики (с поправкой на уд. вес)

Дальнейшие измерения мы производили в приборе, изображенном на рис. 3. Прибор представляет сосуд с двойными стенками, посеребренный и эвакуированный. На стенках оставлены не посеребренными две вертикальные полосы для освещения и съемки. Середина прибора и его нижняя часть целиком заполняется водой или раствором. Открывая кран *a* и оттянув поршень шлифа *b*, мы втягивали в прибор небольшое количество воздуха. Закрыв кран и передвигая поршень, можно получить пузырек нужного размера в горизонтальном капилляре *e*. Затем этот пузырек передавливается в расширение под вертикальным капилляром. Определение скорости летящего пузырька производилось с помощью киносъемки путем одновременного пуска киноаппарата и надавливания на поршень шлифа *b*. Аппарат устанавливался на расстоянии порядка 20 см от верхнего конца вертикального капилляра. Для съемки к отверстию для кинообъектива приставлялась труба горизонтального микроскопа с дальнефокусным объективом. При этом пузырьки на кадрах получались или в натуральную величину, или уменьшенные в 1,5—3 раза.

Съемка производилась при скорости 60 кадров в 1 сек. Для точного наведения летящих пузырьков на фокус в сосуд помещалась вертикально висящая стеклянная палочка и перемещалась до тех пор, пока летящие пузырьки не начинали ударяться об нее. Для расчета диаметра пузырьков и скорости их полета предварительно снималась эта палочка, диаметр которой известен, затем она убиралась и производилась киносъемка летящего пузырька. Вычисление диаметра пузырька и скорости его полета производилось соответствующими измерениями на снятых кадрах при помощи горизон-

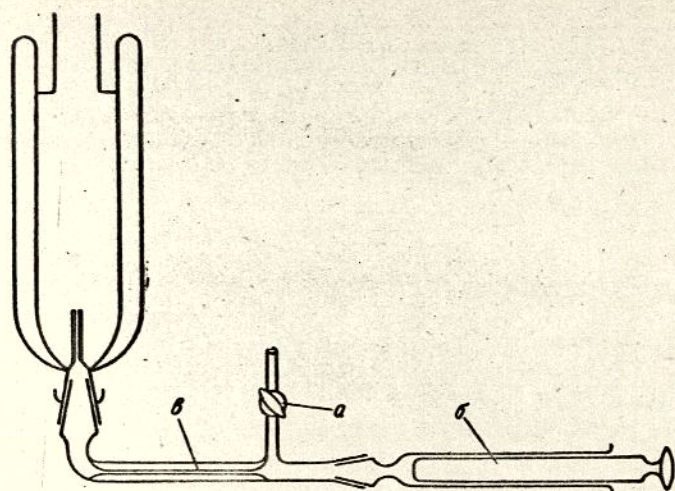


Рис. 3

тального микроскопа, снабженного окулярмикрометром; полученные результаты изображены на рис. 4. Вследствие цилиндричности стенок сосуда, в котором производилась киносъемка, получается небольшое увеличение горизонтального размера снимаемого объектива. Внеся соответствующие исправления, мы получили очень хорошее сходство между визуальными опытами и киносъемкой в опытах с дважды перегнанной водой (рис. 1).

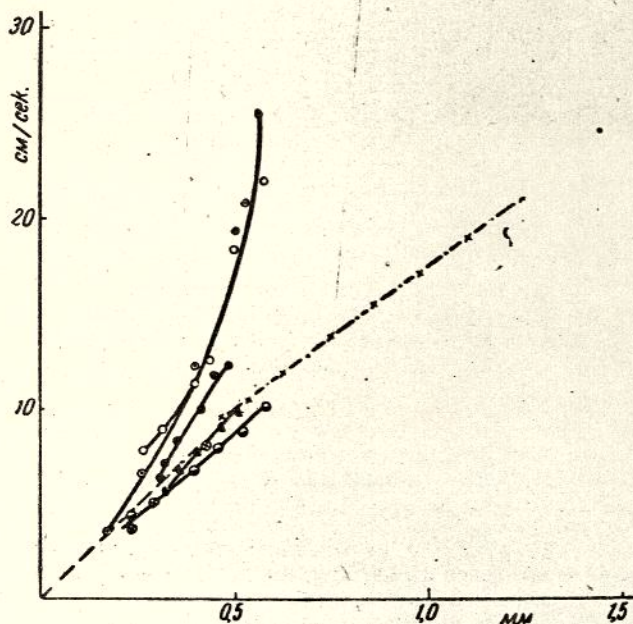


Рис. 4. Измерения в растворах спиртов: $\bigcirc$ — дважды перегнанная вода (кино); $\odot$ — то же (визуальн.); $\bullet$ — бутил. спирт. 10^{-3} — 10^{-1} M; $\ominus$ — амилловый спирт $5 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-2}$ M; $\otimes$ — гексилловый спирт $1 \cdot 10^{-4}$ M; $\oplus$ — октилов. спирт $3 \cdot 10^{-5}$ — $3 \cdot 10^{-4}$ M; — — — Аллен (экспериментальная кривая); $\times$ — $\times$ — стеклянные шарики (исправлено на плотность)

Сравнение с теоретической кривой Левича показывает, что полученная нами кривая имеет совершенно аналогичную форму, но дает несколько меньшие скорости, причем расхождение не превышает 30%.

Как показали опыты Крюковой, малейшие следы загрязнений оказывают настолько сильное тормозящее действие на движение поверхности ртутной капли, что на основе этого явления ею был разработан способ определения следов органических веществ в дважды перегнанной воде. Можно было ожидать, что и в случае пузырька наличие незначительных

количеств поверхностно-активных веществ в растворе должно оказывать существенное влияние на скорость его движения, благодаря скоплению этих веществ на нижней кормовой поверхности летящего пузырька, вызывающему замедление движения жидкости на этой части поверхности пузырька, вследствие чего должно произойти расширение области турбулентности и уменьшение скорости подъема пузырька.

Действительно, достаточно было заменить прокипяченную с перманганатом и дважды перегнанную воду на обыкновенную, чтобы получить резкое снижение скорости подъема пузырьков (рис. 2). Интересно отметить, что в вышеприведенных опытах Шабалина и Аллена (рис. 1) пузырьки имели примерно такую же скорость. Вероятно, авторы в своих опытах также пользовались обычной водой. Люксингер (там же) получил несколько большие скорости, очевидно, за счет того, что применял обычную дистиллированную воду. Таким образом, становится ясной причина расхождения приведенных опытов с данными теории.

Нами было также исследовано влияние гомологического ряда спиртов на скорость полета пузырьков. Как показывает таблица 1, это влияние сказывается уже при очень незначительной концентрации спирта.

Таблица 1
Минимальные концентрации спиртов,
оказывающие влияние на скорость
подъема пузырьков

Название спирта	Концентрация
Бутиловый	$1 \cdot 10^{-4} M$
Амиловый	$5 \cdot 10^{-5} M$
Гексиловый	$1 \cdot 10^{-5} M$
Октиловый	$3 \cdot 10^{-6} M$

На рис. 4 приведены результаты измерений в растворах спиртов. Как видно из кривых, начиная с некоторой концентрации, ($1 \cdot 10^{-3} M$ для бутилового спирта, $5 \cdot 10^{-4} M$ — для амилового, $1 \cdot 10^{-4} M$ — для гексилового и $3 \cdot 10^{-5} M$ — для октилового) достигается максимальное влияние данного вещества, вероятно соответствующее пределу адсорбции этого вещества на нижней (кормовой) поверхности пузырька. Действие спиртов в гомологическом ряду постепенно усиливается вплоть до гексилового спирта, октиловый спирт дает тот же эффект, что и гексиловый.

Нужно отметить, что при исследовании тормозящего действия адсорбции спиртов на движение поверхности при вытекании капель ртути из капилляра Крюкова обнаружила максимум действия при определенной концентрации в случае бутилового и амилового спиртов, что находится в согласии с теорией Фрумкина и Левича [10]. До настоящего времени не удалось построить количественной теории для случая торможения движения адсорбцией при больших числах Рейнольдса. В этих условиях возможны значительные отклонения от первоначального равномерного распределения адсорбированного вещества под влиянием переноса его движущейся поверхностью, что сильно усложняет картину явления.

Максимальное замедление скорости для самых крупных из взятых нами пузырьков составляет 2,5 раза. Очевидно, при этом движение жидкости на поверхности пузырька в его кормовой части полностью парализовано, вследствие чего он должен лететь с той же скоростью, что и твердый шарик того же диаметра. На том же рис. 1 изображена полученная нами прямая, соответствующая скорости падения стеклянных шариков, деленной на 1,3, так как плотность стекла равнялась 2,3. Небольшое расхождение

в скоростях пузырьков и шариков объясняется, быть может, тем, что шарики имели не вполне сферическую форму.

Переходя к обсуждению экспериментальных результатов, следует отметить, что полученное нами понижение скорости не может быть объяснено изменением поверхностного натяжения, вызванного добавлением спирта. Действительно, экстраполируя литературные данные для взятых нами концентраций, получаем следующие значения, из которых можно сделать определенный вывод, несмотря на их приближенный характер:

Таблица 2

Название спирта	Концентр. в мол.	Пониж. поверх. натяж. против чистой воды в динах
n-гексиловый спирт	$1 \cdot 10^{-3}$	0,06
	$1 \cdot 10^{-4}$	0,6
n-октиловый спирт	$3 \cdot 10^{-3}$	0,1
	$1 \cdot 10^{-3}$	0,25
	$3 \cdot 10^{-3}$	0,56
	$3 \cdot 10^{-4}$	8,2

За исключением раствора $3 \cdot 10^{-4}$ M октилового спирта, все остальные растворы дают настолько малое понижение поверхностного натяжения, что оно никак не может вызвать замедления скорости полета пузырька, наблюдаемого в наших опытах, за счет изменения его формы. Можно с полной достоверностью считать, что отклонение формы пузырьков от сферической в случае растворов спиртов было то же, что и в случае чистой воды, и, следовательно, сопротивление движению не могло измениться по чисто геометрическим причинам. Точно так же найденный эффект не может быть отнесен за счет изменения вязкости или плотности воды при добавлении спирта вследствие незначительности этих изменений.

Таким образом, наблюдаемые эффекты влияния поверхностно-активных веществ должны быть целиком отнесены за счет торможения тангенциального движения и увеличения области турбулентности.

В заключение считаю необходимым выразить благодарность А. Н. Фрумкину и В. Г. Левичу за интерес, проявленный ими к настоящей работе.

Выводы

1. Экспериментальная проверка теории движения пузырьков газа в жидкости, предложенная Левичем, показала, что полученные нами скорости расходятся с теоретическими не более чем на 30%. Область, исследованная нами, соответствует числам Рейнольдса от 10 до 450.

2. Найдено, что скорость подъема пузырьков крайне чувствительна к малейшим следам загрязнений, чем и объясняются пониженные в 1,5—2 раза значения, приводимые обычно в литературе.

3. Исследовано влияние гомологического ряда жирных спиртов, максимальное действие которых дает понижение скорости в 2,5 раза против скорости в чистой воде. На основании теории, развитой Левичем и Фрумкиным, этот эффект объясняется полной задержкой движения жидкости на нижней (кормовой) части пузырька, вызывающей увеличение области турбулентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bond a. New ton, Phil. Mag., (6), 22, 755, 1911.
 2. Allen, Phil. Mag., 323, 1920.
 3. Handb. d. Experimentalphys., 4, 2, 349.
 4. Miyagi, Techn. Repts., 4, 1, 1924.
 5. Brien a. Gasline, Ind. Eng. Chem., 1436 1935; Binder, Chem. a. Met. Eng., 51, 104, 1944.
 6. Левич, ЖЭТФ, 19, в. 1.
 7. Ш а б а л и н, Диссертация, Свердловск, 1942; Luch s i n g e r, Koll. Z., 81, 180, 1937.
 8. Фрумкини Левич, Журн. физ. хим., 21, 1183, 1947.
 9. Крюкова, Журн. физ. хим., 20, 1179, 1946; Багодкая и Фрумкин, ДАН, 55, 135, 1947.
 10. Фрумкин, Юбилейный сборник АН СССР, 1, 512, 1947.
-