

**ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТЯХ:
КАК ИХ ЗАСТАВИТЬ СЛУЖИТЬ ЧЕЛОВЕКУ? *)****А. Хейуорд**

Исторический обзор экспериментов по исследованию отрицательных давлений и обсуждение современного состояния вопроса и приложений.

Как-то на одной из установок в моей лаборатории висел плакат: «Вода в этой камере переохлаждена и вместе с тем перегрета». Однако вскоре его пришлось снять, так как он отнимал у меня слишком много времени. Не нашлось ни одного посетителя, который поверил бы в то, что написано на плакате, без длинных разъяснений с моей стороны. Беседа обычно происходила так:

Посетитель: Наверное, имеется в виду, что на дне сосуда вода переохлаждена, а сверху — перегрета? Старые шуточки!

Я: Ничего подобного. Каждая капля жидкости, если угодно, даже каждая ее молекула, находится и в переохлажденном, и в перегретом состоянии.

Посетитель: Но это же абсурд! Как может что-то находиться одновременно в двух противоположных состояниях?

Тогда уже парадокс приходилось объяснять. Количество времени, которое обычно занимало объяснение, зависело как от гибкости ума посетителя, так и от его знаний в области физики жидкостей. Некоторым было известно, что воду, находящуюся в очень чистом сосуде при атмосферном давлении, можно, не вызывая кипения, нагреть до температуры значительно выше 100 °С. Это первое, что приходит в голову, когда произносятся термин «перегретый». С другой стороны, та же самая вода может быть перегрета и без передачи дополнительного тепла, если давление у ее поверхности будет ниже давления насыщенного водяного пара.

Налив воду в чистый сосуд, вы можете охладить ее до температуры на несколько градусов ниже 0 °С, причем так, что вода не замерзнет. В этом случае говорят, что вода находится в переохлажденном состоянии. Перегрев и переохлаждение являются примерами метастабильных состояний. В качестве других примеров можно привести пересыщение в газовых растворах (например, открытая аккуратно, без встряски, бутылка содовой воды) или же пересыщенные растворы твердых веществ. В каких бы формах ни проявлялась метастабильность, их объединяет одно общее свойство — вещество мгновенно выводится из состояния метастабильности, если начи-

*) Alan T. J. H a y w a r d, Negative Pressure in Liquids: Can It Be Harnessed Serve Man?, American Scientist 59, 434 (1971). Перевод Н. Я. Смородиной.

Автор статьи Алан Т. Дж. Хейуорд — главный научный специалист Национальной инженерной лаборатории, Ист-Килбрайд, Глазго, Шотландия.

нается процесс образования зародышей другой фазы. Например, введение незначительного кристаллика льда в переохлажденную воду вызывает быстрое замерзание всей воды, а введение небольшого пузырька газа в перегретую воду (например, на пылинке, упавшей в воду) вызывает ее закипание.

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ

В 1843 г. Донни¹ впервые показал, что жидкость может существовать еще в одном метастабильном состоянии, называемом отрицательным давлением или гидростатическим растяжением. На рис. 1 показана установка, сходная с той, которой пользовался Донни. Она состоит из U-образной трубки, длинная часть которой сверху запаяна, а короткая часть соединена с вакуумным насосом. Если длинную часть трубки целиком заполнить жидкостью (наклонив ее горизонтально и возвратив затем в вертикальное положение), то жидкость будет удерживаться в ней атмосферным давлением над свободной поверхностью В. Когда абсолютное давление в точке В уменьшается до величины, близкой к нулю, уровень жидкости в длинной части трубки обычно тоже падает до тех пор, пока не сравняется с поверхностью В. Однако если избавиться от активных центров (зародышей) в жидкости, удалив все следы нерастворен-

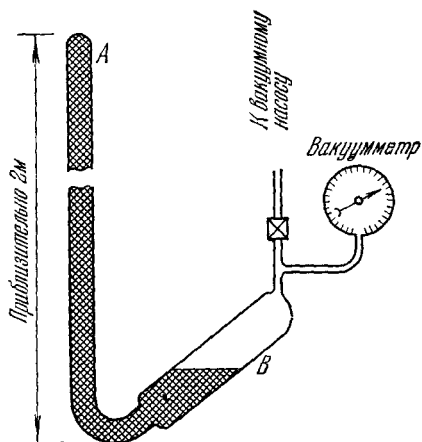


Рис. 1. Манометр растяжения.

ного газа из длинной части трубки, уровень жидкости в ней не изменится, когда давление в точке В упадет до нуля. При этих условиях давление в точке В будет меньше абсолютного нуля давлений на величину, зависящую от высоты АВ.

Чтобы получить приемлемую чистоту трубки и устранить активные зародыши, Донни в качестве исследуемой жидкости в своих опытах использовал серную кислоту, дегазируя ее перед началом опытов в вакууме. Высота манометра в опыте Донни составляла всего 1,25 м, поэтому максимальные отрицательные давления не превышали $-0,12$ бар. Через несколько лет этот эксперимент повторил О. Рейнольдс^{2,3}. В его опыте очищенные трубки, смоченные водой, наполнялись ртутью. Используя трубки длиной до 2,5 м, Рейнольдс получил отрицательные давления почти в -3 бар. По-видимому, это самые высокие отрицательные давления, достигнутые когда-либо манометрическим методом.

Приблизительно в то же время Бергло⁴ придумал новый способ получения гораздо более высоких отрицательных давлений. Запаив один конец стеклянного капилляра и заполнив капилляр водой, Бергло запаивал на пламени и второй конец, стараясь, чтобы пузырек, оставшийся в верхнем конце трубки, был минимален. При постепенном нагревании запаянного капилляра вода начинала расширяться, давление в ней росло, в результате чего оставшийся пузырек воздуха растворялся и вода заполняла весь объем капилляра. Тогда нагревание прекращалось и трубка начинала медленно остывать, однако вода продолжала заполнять весь ее объем. Вместо того чтобы сжиматься при охлаждении, вода в этих опытах прилипала к стенкам капилляра и в ней возникали довольно высокие отрицательные давления. Когда, наконец, наступал разрыв воды,

раздавался громкий щелчок, сопровождавшийся неожиданным появлением пузырька.

На основании некоторых весьма сомнительных предположений Бертло в 1850 г. сделал вывод о том, что в его опыте с запаянными капиллярами давления достигали -50 бар. Более ранние оценки⁵ получаемых таким способом давлений дали целый интервал значений от -100 до -150 бар.

Истинные значения давлений были неизвестны до тех пор, пока, наконец, в 1911 г. Майер⁶ не провел серию опытов по прямому измерению

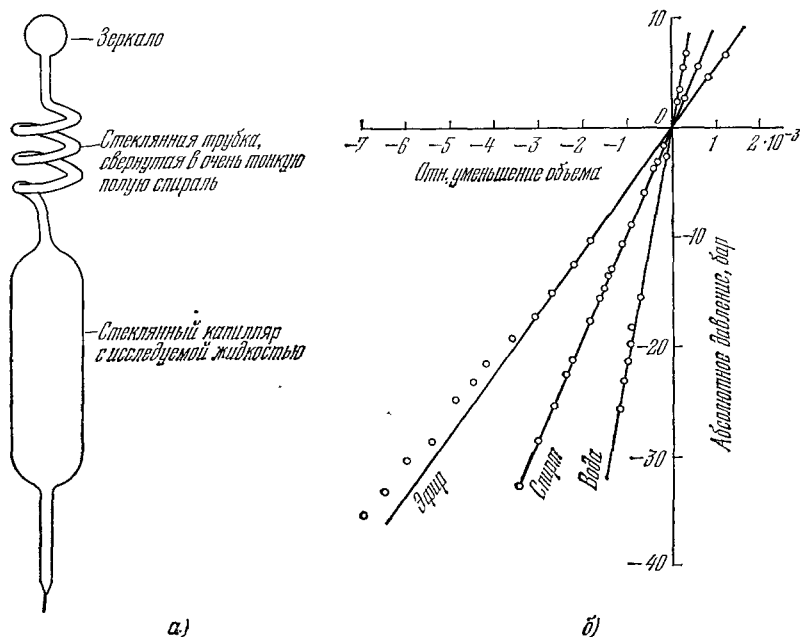


Рис. 2. а) Прибор Майера для получения отрицательных давлений; б) результаты опытов Майера.

отрицательных давлений в капиллярных трубках Бертло, которые он заполнял по очереди водой, спиртом и эфиром.

Схема опыта Майера показана на рис. 2, а. Один конец капиллярной трубки был вытянут в очень тонкую полую спираль, к верхнему концу которой прикреплялось зеркало. Затем трубка заполнялась жидкостью, а нижний ее конец запаивался, как и раньше. Однако перед запаиванием трубка калибровалась. Для этого к находящейся в ней жидкости несколько раз прикладывали известные положительные давления вместе с измерением каждый раз угла поворота стеклянной спирали. Этот угол определялся с хорошей точностью по отклонению луча света, сфокусированного на поверхности зеркала. Таким образом, прибор Майера представлял собой трубку Бертло со встроенным в нее измерителем давлений.

С помощью этого простого, но весьма хрупкого прибора (внутренний диаметр стеклянной спирали составлял лишь доли миллиметра) Майер убедительно показал, что максимальные давления, которые можно получить в опыте Бертло, лежат в области -30 бар. (Этот результат был впоследствии подтвержден другими методами⁵.) Майер же впервые измерил и растяжимость всех трех жидкостей. Эти результаты приведены на рис. 2, б. Видно, что в области отрицательных давлений растяжимость,

равная $(-1/V)(dV/dP)$, практически совпадает со сжимаемостью при небольших положительных давлениях.

С тех пор и вплоть до последнего времени растяжимость жидкостей никто не измерял. Лишь несколько лет назад с помощью стальных трубок Бертло, на внешней поверхности которых был укреплен измеритель напряжений (рис. 3), я, наконец, подтвердил результаты Майера⁷. Должен сказать, что я преклоняюсь перед Майером, потому что, несмотря на все

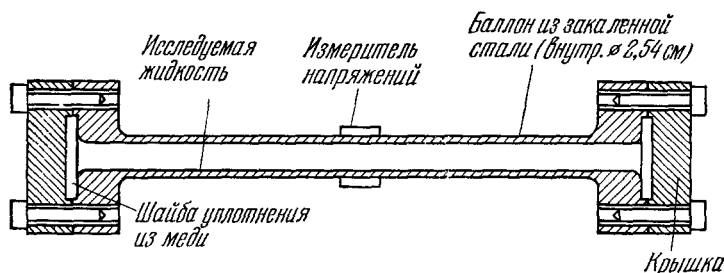


Рис. 3. Металлическая трубка Бертло с измерителем напряжений, который используется как указатель изменения давления.

преимущества современного оборудования, мне не удалось достичь большей точности, чем та, которую Майер с его хрупкими стеклянными трубочками получил за столетия до меня. По-моему, он был одним из самых искусных экспериментаторов своего времени.

Еще один интересный прибор для получения отрицательных давлений был сконструирован Винсентом⁸. Металлический сиффон наполнялся жидкостью, а затем растягивался. Давление в жидкости определялось по величине силы, которая прикладывалась к сиффону, и по площади его поперечного сечения. Несмотря на то, что многие исследователи^{9,10} в точности скопировали установку Винсента, им удавалось получить на ней давление всего в несколько бар, после чего жидкость претерпевала разрыв.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Существует множество способов получения кратковременных отрицательных давлений динамическим методом. Например, в работах Винсента¹¹ использовалось температурное сжатие вязкой жидкости. Когда вязкая жидкость быстро прогонялась сквозь тонкую трубку, в конце трубки возникали давления в несколько бар. Темперли и Чэмберс¹², быстро прокачивая воду через сужающуюся трубу, получали отрицательные давления до $-0,3$ бар. Больших давлений этим методом добиться не удалось.

Давления, полученные в опытах Баджетта¹³, достигали уже нескольких бар. Для этого брались два закаленных стальных бруска, прижатых друг к другу тщательно отполированными поверхностями, которые разделяла лишь очень тонкая пленка воды. При попытках оторвать бруски друг от друга возникали отрицательные давления. Я повторил этот эксперимент, разделив слоем вязкой жидкости две плиты из прозрачного полимера. Установка, на которой я работал, изображена на рис. 4.

На рис. 5 показаны крупноплановые кинокадры, полученные в течение нескольких миллисекунд до и после того, как при отрицательном давлении -5 бар произошел разрыв жидкости между плитами. Видно, что в момент разрыва жидкость разбивается на множество пузырьков.

Можно добиться того же эффекта, если пропускать вязкую жидкость между двумя соприкасающимися валиками, вращающимися в разные стороны. Как показано на рис. 6, жидкость, попадая в зазор между

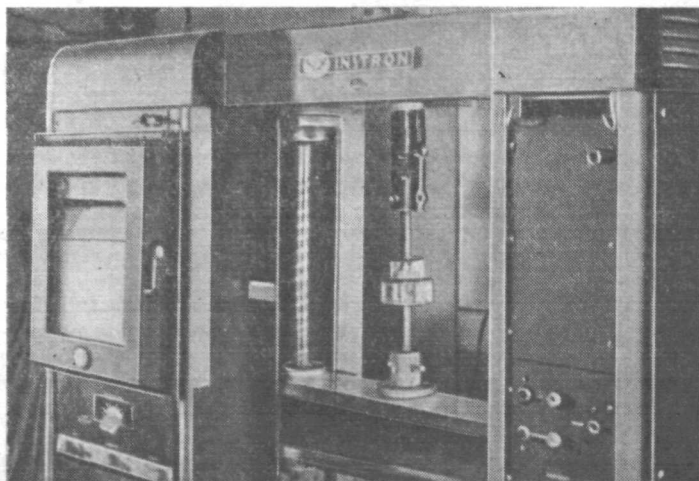


Рис. 4. Отрицательные давления на этой установке возникают в момент отрыва друг от друга двух пластин из прозрачного полимера, разделенных лишь тонкой пленкой воды.

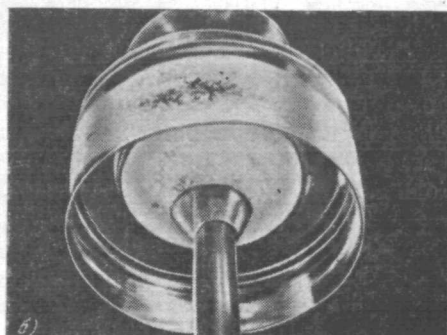
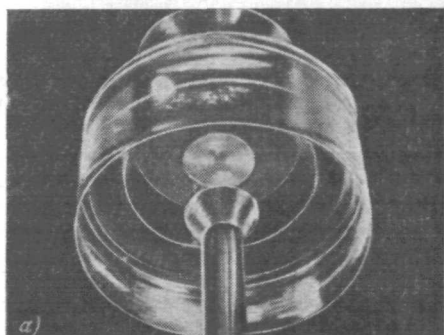


Рис. 5. Растянутая пленка вязкой жидкости до разрыва (а) и после разрыва (б).

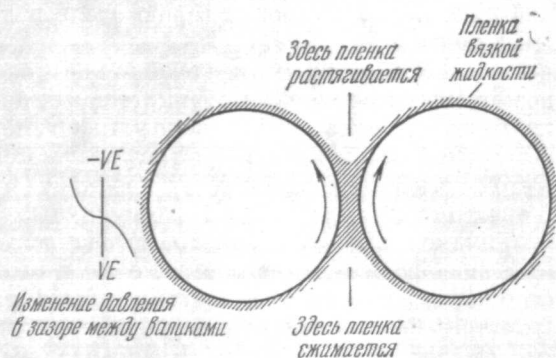


Рис. 6. Возникновение отрицательных давлений между двумя валиками, вращающимися в противоположные стороны.

валиками, сжимается, а выходя из зазора — растягивается. Если скорости вращения невелики, то растяжение жидкости ослабляется вязкостью потока в пленке. При высоких скоростях вращения растяжение жидкости может так возрасти, что растянутая пленка с треском лопается и капля жидкости, как из катапульты, выбрасывается в воздух. Это явление, по-видимому, лежит в основе эффекта «летающей краски». (Когда ротационные печатные станки запускают на слишком большой скорости, в воздухе образуется мелкая пыль из капелек типографской краски, и вся работа в типографии идет насмарку.)

Кратковременные отрицательные давления в жидкости обычно возбуждают ¹⁴⁻¹⁶, воздействуя на нее мощным потоком ультразвуковых колебаний. Максимальные значения, полученные таким способом, как правило, не превышают нескольких десятков бар, хотя иногда появляются работы ¹⁵, в которых сообщается о достижении давлений —100 бар. Для получения отрицательных давлений использовались также одиночные импульсные ударные волны ¹⁷, однако таким способом тоже не удалось получить натяжения выше нескольких десятков бар.

Время от времени небольшие неустановившиеся отрицательные давления обнаруживают в обычных инженерных узлах, например в маслопроводе опорного подшипника ¹⁸, в выходном отверстии гидравлического насоса с принудительным приводом ¹⁹ и в местах кавитации у систем с циркулирующей водой ²⁰. Однако возникновение отрицательных давлений в таких условиях крайне непредсказуемо и, следовательно, эти системы не годятся для того, чтобы использовать их для получения отрицательных давлений в лаборатории.

Бауден и Мак-Они ²¹ показали, что через нитроглицерин перед взрывом проходит волна отрицательного давления. Этот способ тоже едва ли можно возвести в ранг лабораторного метода получения отрицательных давлений (по крайней мере, если исследователь дорожит своей лабораторией!).

МИРОВОЙ РЕКОРД

Из тех, кто занимался отрицательными давлениями, вероятно самой значительной фигурой был покойный Л. Бриггс. Этим явлением Бриггс интересовался всю жизнь. Однако, будучи директором Национального бюро стандартов, он не располагал временем для исследований до тех пор, пока в 1945 г. не вышел в отставку. С этого момента отрицательные давления стали его хобби, и, занимаясь ими почти всю оставшуюся жизнь (Бриггс умер в 1962 г.), он опубликовал серию очень интересных работ. Наиболее значительные из них ²²⁻²⁴.

Бриггс первым из современных исследователей оценил огромные потенциальные возможности получения отрицательных давлений центробежным методом. Отрицательные давления возникают, когда капилляр, заполненный исследуемой жидкостью, быстро вращается в плоскости своей оси. Этот метод не использовался с тех пор, как (еще в XIX веке) Рейнольдс ²⁵ и Уортингтон ²⁶ получили с его помощью давление всего в несколько бар. Трудность центробежного метода состоит в том, что жидкость в прямом вращающемся капилляре, открытом с обеих сторон, находится в неустойчивом равновесии и поэтому выплескивается наружу. Рейнольдс и Уортингтон обошли эту трудность, используя в своих опытах изогнутую трубку, у которой плечи очень сильно различались по длине, а конец более короткого плеча был запаян. По мнению Бриггса, плохие результаты получались из-за того, что внутреннюю поверхность изогнутого капилляра невозможно очистить достаточно хорошо. Поэтому он решил использовать открытую с обоих концов трубку, очистить которую

гораздо легче. Чтобы добиться устойчивого равновесия, Бриггс придал трубке форму буквы Z с удлиненной центральной частью. Давления, достигнутые с помощью этого прибора, были примерно в десять раз больше, чем во всех предыдущих экспериментах.

Бриггс исследовал много разных жидкостей. Рекордное значение отрицательного давления -425 бар ему удалось получить в опытах с ртутью (для этого ему пришлось разработать методику смачивания ртутью стеклянных поверхностей).

На рис. 7 представлены результаты Бриггса для воды. Эти результаты менее эффектны (чем для ртути), однако более интересны из-за необычной формы графика. Предельные отрицательные давления постепенно уменьшаются с увеличением температуры от 5 до 50 °С. Это можно понять, опираясь на работу Темперли ²⁷, который показал, что сила растяжения идеальной жидкости Ван-дер-Ваальса падает с возрастанием температуры и обращается в нуль при температуре $27 T_K/32$, где T_K — абсолютное значение критической температуры. В принципе уравнение Ван-дер-Ваальса не описывает поведение воды количественно, но оно дает достаточно хорошие качественные предсказания, поэтому уменьшения максимально достижимых растяжений с возрастанием температуры следовало ожидать.

Тем неожиданнее было резкое падение предельного растяжения воды при уменьшении температуры от 5 до 0 °С. Это явление противоречит всем теоретическим предсказаниям и до сих пор еще не нашло себе объяснения. Пока можно лишь сказать, что, поскольку наиболее заметно (от 200 до -20 бар) предельное растяжение падает в интервале 4—0 °С, наблюдаемая аномалия, по-видимому, связана с другим аномальным свойством воды, которое проявляется в том же температурном интервале — с отрицательным знаком коэффициента теплового расширения.

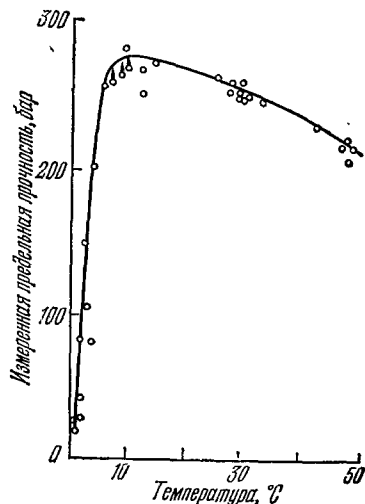


Рис. 7. Зависимость максимального растяжения воды от температуры (по Бриггсу) *).

ПЕРЕОХЛАЖДЕННО-ПЕРЕГРЕТАЯ ВОДА

Я надеюсь, что всех, до самого последнего скептика, мне удалось, наконец, убедить в существовании давлений, меньших нуля. Теперь понятно, как объясняется парадокс, с которого начиналась эта статья. Будем постепенно понижать давление в жидкости каким-нибудь способом, позволяющим в конце концов получить в ней отрицательное давление. По мере уменьшения давления наступит момент, когда оно станет равным давлению насыщенных паров этой жидкости, а как только оно упадет еще ниже, жидкость окажется в перегретом состоянии. Если при этом в жидкости были какие-либо зародышевые центры, она немедленно закипит. Продолжая уменьшать давление в жидкости, мы достигнем в ней нулевого, а затем отрицательного давления. Это вовсе не означает, что жидкость перестала быть перегретой. Отрицательное давление —

*) В нашей литературе (см., например, М. К о р н ф е л ь д, Упругость и прочность жидкостей, М.—Л., Гостехиздат, 1951) максимальное растяжение жидкости называют ее предельной объемной прочностью. (Прим. перев.)

ниже давления насыщенных паров, и поэтому, по определению, жидкость при отрицательном давлении находится в перегретом состоянии. Появление в жидкости зародышевых центров выводит ее из состояния отрицательного давления, и она в ту же секунду вскипает. Таким образом, для того чтобы получить переохлажденно-перегретую жидкость, достаточно сначала создать в ней отрицательное давление, а затем осторожно охладить ее ниже точки плавления. Проще всего это делается с помощью изображенного на рис. 1 манометра растяжений, слегка видоизмененного в соответствии с рис. 8, а. Верхний конец длинной части трубки загибается вертикально вниз. Эта изогнутая часть трубки (длина ее равна нескольким сантиметрам) помещается в прозрачный кожух, внутри которого циркулирует охлаждающее вещество.

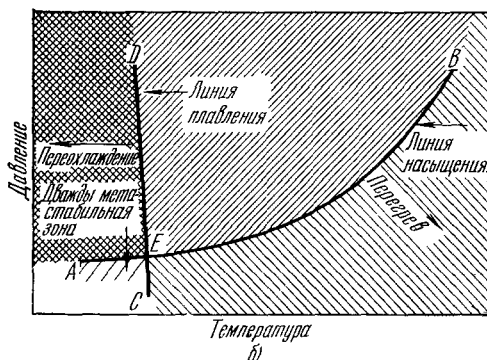
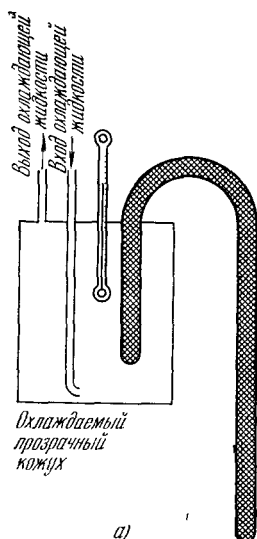


Рис. 8. а) Верхняя часть манометра растяжений, видоизмененного для того, чтобы переохлаждать перегретую жидкость; б) фазовая диаграмма воды.

С помощью этой установки при давлении около $-0,2$ бар можно с легкостью охладить воду по крайней мере до -5°C без замерзания. При дальнейшем охлаждении вода сразу начинает замерзать. Камера заполняется кристаллами льда, и в то же время вода, находящаяся в промежутках между кристаллами, обычно кипит, тем самым выводя всю систему из состояния с отрицательным давлением. Таким образом, вода внезапно оказывается в тройной точке, т. е. при той единственной комбинации давления и температуры, когда три разных фазы воды — лед, жидкость и пар — могут находиться в равновесии.

Однако может случиться и так, что с появлением кристаллов льда отрицательное давление не исчезнет. Это произойдет лишь в том случае, если перед началом эксперимента вода была очень тщательно очищена от растворенного в ней воздуха. Если же хоть немного воздуха останется, он выделится при образовании льда и эти пузырьки станут зародышевыми центрами кипения воды.

На рис. 8, б показана фазовая диаграмма воды, иллюстрирующая условия, при которых вода в этом эксперименте могла стать переохлажденно-перегретой. AB — линия насыщения, разделяющая области жидкой и газообразной фаз воды.

Если в области под линией AB вода остается жидкостью, то это означает, что она находится в метастабильном перегретом состоянии. CD — это линия плавления, т. е. линия, разделяющая жидкую и твердую фазы воды. Если слева от линии CD вода продолжает оставаться жидкостью, то она находится в метастабильном переохлажденном состоянии.

Точка E , в которой линии AB и CD пересекаются, называется тройной точкой.

Небольшой заштрихованный участок AEC есть дважды метастабильная область. Оставаясь в этой области жидкостью, вода должна быть переохлаждена и перегрета одновременно.

Если бы молекулы жидкой воды, находящиеся в дважды метастабильной области, обладали даром речи, то свое состояние они описывали бы примерно так:

«Здесь собралась пока куча шизофреников. Мы все мечтаем одновременно и замерзнуть, и вскипеть, но нам прекрасно известно, что ни одна из нас не может и то, и другое сделать одновременно. Статистически определено, что в критический период одни из нас замерзнут, другие — закипят, а оставшиеся будут в жидком состоянии до тех пор, пока все мы, наконец, снова не обретем душевный покой. И только Их Величество Случай решит, кому из нас что делать».

ОБРАЗОВАНИЕ ЗАРОДЫШЕЙ

До сих пор непонятно, удалось ли Бриггсу получить правильные значения предельной растяжимости тех жидкостей, которые он исследовал. Очень жаль, что ни Бриггс, ни авторы экспериментальной работы ²⁸, выполненной на таком же оборудовании, по-видимому, не измеряли степень растяжения жидкостей при высоких отрицательных давлениях.

На основании этих измерений можно было бы судить о правильности результатов Бриггса, ибо с молекулярной точки зрения степень растяжения жидкости должна очень резко возрастать при приближении к пределу устойчивости.

Тем не менее существует один бесспорный факт. Все жидкости, которые до сих пор исследовали, всегда претерпевали разрыв при давлениях значительно ниже — 100 бар. Поэтому экспериментаторы просто не могли попасть в область давлений, близких к пределу прочности. В трубках Берто разрыв жидкости происходит при давлениях порядка одной десятой тех давлений, которые получал Бриггс, а при измерении предельной прочности сильфонным методом разрыв жидкости наступает уже при сотых долях давлений, достигнутых Бриггсом.

По-видимому, дело в том, что во всех этих экспериментах идет процесс образования зародышей. В результате в жидкости возникают пузырьки пара, и она мгновенно выводится из своего метастабильного состояния, причем задолго до того, как будет достигнуто предельное растяжение. Образование зародышей в этом случае идет, по-видимому, так же, как в жидкости, находящейся в двух схожих метастабильных состояниях — в переохлажденном состоянии и в состоянии перенасыщения растворенными газами.

На протяжении всего последнего столетия, а может быть даже несколько дольше, образование пузырьков во всех трех случаях изучали как одну и ту же задачу. До ее решения пока далеко, однако за последние несколько лет были достигнуты кое-какие успехи на пути к ее пониманию.

Суть задачи состоит в том, что в состоянии равновесия давление внутри пузырька должно быть больше, чем давление в окружающей его жидкости, на величину $2T/R$, где T — поверхностное натяжение, а R — радиус пузырька. Для пузырька с радиусом в 1 мкм это добавочное давление составляет 1 бар. Для пузырьков меньшего размера это давление соответственно еще больше. Предположим, что какой-нибудь маленький пузырек начинает расти. Тогда следует ожидать, что либо внутри него

создается очень высокое давление, либо же в жидкости должны существовать очень высокие напряжения. Однако факты противоречат этим выводам. В жидкостях, для которых заведомо не выполняются перечисленные условия, пузырьки тем не менее возникают и начинают увеличиваться в размерах. Одно из возможных решений задачи предложил Герне ²⁹ около ста лет назад. Он заметил, что на стенках сосуда с содовой водой пузырьки образуются лишь в некоторых вполне определенных местах. Герне предположил, что крохотные частицы воздуха, попадая в мельчайшие трещинки на стенках сосуда, становятся активными зародышами. Тогда удается обойти трудность, связанную с самозарождением пузырьков, потому что при таком предположении получается, что пузырьки

не возникают сами по себе, а образуются из микроскопических зародышей.

Этот подход был вскоре опровергнут Томлинсоном ^{30,31} и не использовался вплоть до 40-х годов нашего столетия. В качестве основного возражения выдвигался тот факт, что по закону Генри (растворимость любого газа в жидкости прямо пропорциональна его давлению) весь процесс образования пузырьков нельзя объяснить только тем, что в жидкости уже существуют микроскопические газовые пузырьки. Давление внутри такого зародыша должно было бы очень сильно возрасти за счет поверхностного натяжения, в результате чего сжатый газ должен был

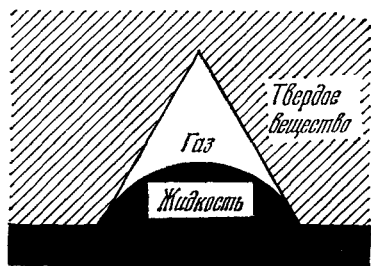


Рис. 9. Стабилизация микрзародыша газа в трещине на водоотталкивающей твердой поверхности (по модели Харви).

бы быстро раствориться в окружающей его жидкости. Если все происходит именно так, то довольно трудно себе представить, каким образом могут выживать микроядра. В 1944 г. эту загадку сумел разгадать Харви ³². Он обратил внимание на то, что микроскопический зародыш газа, находящийся в трещине, может выжить, если поверхность сосуда не смачивается находящейся в нем жидкостью. Из рис. 9 видно, что в этом случае краевой угол принимает такое значение, при котором поверхностное натяжение уменьшает давление газа внутри зародыша. Если же жидкость смачивает стенки сосуда, то поверхностное натяжение увеличивает давление внутри зародыша, как и для обычного пузырька.

После работы Харви существование микрзародышей газа, сконцентрированных на стенках сосуда или же на взвешенных пылинках, стало общепринятой гипотезой.

Впоследствии высказывались и другие идеи о механизмах выживания ^{33,34}, однако совсем недавно выяснилось, что только с помощью теории Харви удастся описать новые экспериментальные данные для воды ³⁵.

Это утверждение было результатом целой серии опытов, в которых делались попытки получить искусственные микрзародыши и сравнить экспериментальные данные с разными теориями. Оказалось, что из всех теорий стабилизации микрзародышей справедлива только одна — теория Харви. Покрыв водоотталкивающей силиконовой пленкой слой мелкого прессованного порошка, исследователи получили чрезвычайно эффективный материал для образования на нем зародышей.

Для проверки степени стабильности микрзародышей измерялась величина положительного давления, при котором микрзародыши теряли свою эффективность. Оказалось, что искусственные зародыши, которые получают с помощью синтетического порошка, в 35 раз стабильнее естественных зародышей, которые с самого начала присутствуют в сильно

загрязненной речной воде. Рассматривая частицу такого порошка на экране электронного микроскопа (рис. 10), мы увидим картину, очень похожую на модель Харви.

До совсем недавнего времени считалось, что микророзродыши газа существуют во всех жидкостях. Однако некоторое время назад совершенно независимо друг от друга два человека (профессор Д. Сетте в Италии с помощью ультразвукового оборудования и я сам ³⁵ в Великобритании, используя манометры напряжений) обнаружили, что стабильные микророзродыши газа, существуя в воде, отсутствуют в органических жидкостях. Это значит, что, по крайней мере в случае органических жидкостей, мы опять вернулись в исходную точку, потому что пузырьки в этих жидкостях образуются не из ранее существовавших микророзродышей, а возникают сами по себе. Но как? Термодинамические расчеты ³⁶ показывают, что для образования пузырька в жидкости, находящейся под отрицательным давлением 0,15 бар, требуется энергия порядка 10^8 эв, причем сконцентрированная в области порядка нескольких молекулярных диаметров. До сих пор не нашлось человека, который дал бы этому парадоксу сколько-нибудь приемлемое объяснение.

Сейчас известно несколько способов образования пузырьков в отсутствие микророзродышей газа: ультразвуковые волны, облучение ядерными частицами высоких энергий, некоторые виды механического удара, создание зародышей с помощью трения. Молекулярный механизм концентрации энергии весьма непонятен во всех четырех случаях, но тем не менее наиболее удивителен последний случай, ибо силы, участвующие в опыте с трением, очень и очень малы. Если по дну сосуда с жидкостью перемещать небольшой кусочек мягкой резины или пластика, причем жидкость находится либо под гидростатическим давлением ³⁶, либо перегрета и содержит растворенный газ ³⁷, то в результате внутри сосуда образуются пузырьки. То же самое произойдет, если вы осторожно потрете друг о друга два плоских кусочка льда. Все сказанное до такой степени необъяснимо в свете современных молекулярных представлений о поведении жидкостей, что если бы перечисленные факты не были надежно установлены в эксперименте, их можно было бы считать абсолютно нереальными.

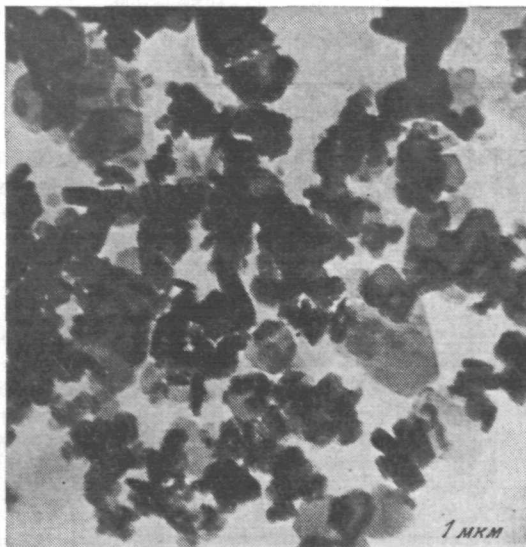


Рис. 10. Частица водоотталкивающего порошка на экране электронного микроскопа.

КАК ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ В ПРИРОДЕ

Из-за того, что в органических жидкостях нет микророзродышей газа, в них сравнительно легко достигаются отрицательные давления. В этом смысле опыты с водой значительно сложнее, потому что из нее надо сначала удалить зародыши и лишь после этого в воде может установиться отрицательное давление. Удаление зародышей производится двумя способами:

воду либо кипятят в вакууме, чтобы выкачать воздух или газ из пузырьков, либо выдерживают под высоким давлением, чтобы микророзорыши газа перешли в раствор.

Однако природа оказывается значительно более изобретательной. Сейчас уже почти не вызывает сомнений тот факт, что в деревьях регулярно происходят процессы, в результате которых древесные соки оказываются под отрицательным давлением; при этом, конечно, не используется ни один из тех грубых способов разделения на зародыши, о которых уже говорилось в начале раздела. Тем не менее механизм этих процессов пока непонятен. Когда Диксон и Джоли³⁸ впервые высказали предположение о том, что древесный сок поднимается по стволу под действием отрицательного давления, этой гипотезе никто не верил. Больше пятидесяти лет находились не только сторонники, но и ярые противники новой теории, однако сколько-нибудь приемлемого объяснения всех существующих фактов в пользу или, наоборот, против теории так и не появилось. Создавалось впечатление, будто людям просто не хочется верить в то, что природа необыкновенно легко умеет управляться с отрицательными давлениями, которые с таким трудом удается обуздать человеку.

Однако за последнее время появилось огромное количество материалов, свидетельствующих о том, что древесный сок действительно поднимается вдоль ствола под отрицательным давлением. По этой причине выступления противников этих взглядов уже почти совсем сошли на нет. Известно, что когда древесный сок испаряется через листовые поры, в капиллярах листьев могут возникать огромные силы притяжения. Если бы с помощью отрицательного давления их можно было бы подвести к корням, то это было бы равносильно поднятию сока на верхушку стометровой секвойи. В точности так же объясняется удивительная способность ризофоры расти, когда ее корни погружены в соленую воду. Жидкость внутри корней содержит довольно мало соли; поэтому, для того чтобы преодолеть действие осмотического давления, давление внутри корней должно быть на несколько бар ниже, чем давление в наружном растворе. Отсюда видно, что в корнях ризофоры неизбежно должны возникать отрицательные давления.

Принципиальная схема эксперимента по обнаружению отрицательных давлений в капиллярах, по которым поднимается древесный сок, состоит в следующем:

1) Внутри стволов высоких деревьев сок, по-видимому, может подниматься всего тремя способами: а) либо его что-то выталкивает снизу, б) либо он поднимается в результате каких-то процессов, происходящих в клетках, через которые он протекает, в) либо же его что-то тянет вверх. Однако предположение а) неверно, потому что давления сока у корней дерева измерены, и оказывается, что у некоторых видов они могут лишь превышать атмосферное давление, причем только в определенные времена года³⁹. Предположение б) тоже не может выполняться, потому что по вертикальному отрезку мертвой ткани сок поднимается выше водяной отметки в барометре. Этот опыт можно, например, осуществить, закрепив в вертикальном положении виноградную лозу, у которой нижний побег убит в высокотемпературной среде⁴⁰. Таким образом, остается единственная возможность (в), состоящая в том, что сок каким-то образом тянут сверху.

2) Сколандер с сотрудниками⁴¹ для измерения отрицательных давлений в деревьях разработали свой метод, который заключается в следующем: с дерева срывается ветка и к месту излома быстро прикладываются разные положительные давления до тех пор, пока не установится равновесие. Измерения показывают, что отрицательные давления прости-

раются от -4 бар для деревьев, растущих в сыром лесу, до -80 бар для кустарников, произрастающих в засушливых районах, где они вынуждены отчаянно бороться за каждую каплю влаги, высасывая ее из пересохшей почвы.

3) Существование отрицательных давлений в растениях уже тоже экспериментально подтверждено как акустическими методами⁴², так и с помощью оборудования, принцип действия которого основан на явлении осмоса⁴³.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА

В природе настолько широко используются отрицательные давления, что просто обидно, как человек до сих пор не нашел им серьезных практических применений. Вопрос состоит в том, навсегда ли останутся отрицательные давления просто лабораторным развлечением, своеобразной игрушкой ученых, или же их можно поставить на службу человечеству.

Прежде чем отвечать на этот вопрос, стоит заметить, что в некоторых пока еще ограниченных областях отрицательные давления уже используются. По крайней мере в трех разных научных приборах фигурируют отрицательные давления, причем для двух приборов отрицательное давление является необходимым условием их нормальной работы. Наиболее известен широко используемый в инженерной метрологии метод измерения длин с помощью прямоугольных брусков из закаленной стали с тщательно отполированными гранями. Толщина каждого бруска известна с точностью до долей микрона. Если, например, нужен эталон длиной 35 мм, то берутся два бруска длиной 25 и 10 мм и прижимаются друг к другу. Необходимо обладать определенной ловкостью рук, чтобы, то сдвигая друг относительно друга две плоские поверхности, то прижимая их друг к другу, добиться того, чтобы они прочно слиплись.

Вопреки общепринятому мнению, для того чтобы два эталона «прилипли» друг к другу, вовсе недостаточно создать вакуум между их поверхностями. Чтобы разнять эталоны, к ним надо приложить давление в несколько атмосфер независимо от того, где их соединяли, в вакууме или при атмосферном давлении. Баджетт¹³ показал, что если эталоны соединяются правильно, то достаточно крохотной капли влаги между отполированными гранями, чтобы между ними образовалась тонкая пленка жидкости. Поверхностное натяжение этой пленки и прижимает бруски друг к другу с такой силой.

При работе с измерительными эталонами отрицательные давления используются не постоянно, а весьма кратковременно, зато гальваносталаметр, изобретенный Слаем и Бреннером⁴⁴, просто не мог бы существовать, если бы не было отрицательных давлений. Гальваносталаметр — это манометр напряжений, наполненный электролитом, в который погружены два электрода, проходящие сквозь стекло в верхней части более длинного колена манометра. Когда через электролит проходит ток, превышающий некоторое критическое значение, образуется пузырек и внутри электролита происходит разрыв, в результате чего уровень жидкости в длинном колене резко падает. Этот прибор позволяет чрезвычайно точно обнаруживать появление в жидкости малейшей примеси газа и с этой целью используется в электрохимических экспериментах.

Существует еще один прибор^{45,46}, в котором непосредственно используются отрицательные давления. С его помощью регистрируются случаи вылета единичных атомных частиц, разделенные большими временными интервалами и имеющие характер последовательности случайных чисел.

В замкнутой камере под действием центробежных сил создается отрицательное давление. Попадая в камеру частица вызывает процесс образования зародышей, давление сразу падает, и этот момент времени фиксируется. Таким образом удалось измерить период полураспада ядра урана-230, определить который обычными способами было невозможно (он оказался равным $4 \cdot 10^{10}$ лет).

Приведенные примеры использования отрицательных давлений могут быть интересны ученому или технологу, но на человека, далекого от науки, они не произведут никакого впечатления. Для того чтобы неспециалист

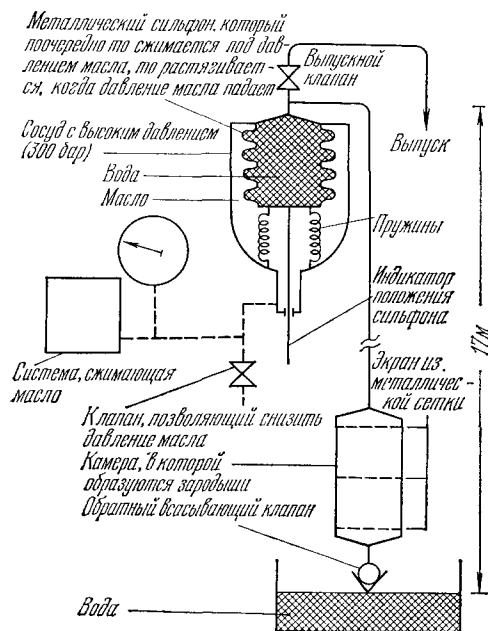


Рис. 11. Упрощенная схема насоса для получения отрицательных давлений, сооруженного в Национальной инженерной лаборатории в Глазго.

хоть немного заинтересовался отрицательными давлениями, нужно прежде всего оборудование, с помощью которого можно было бы в широких масштабах экспериментировать с растяжением жидкостей, что в свою очередь требует конструирования приборов для получения отрицательных давлений. За последнее время в этом направлении был сделан первый шаг. В моей лаборатории недавно построен довольно простой насос отрицательных давлений⁴⁷, в котором высота подъема жидкости составляет 17 м (рис. 11). Он напоминает обычный поршневой насос, но имеет два существенных отличия: 1) для того чтобы избежать сил трения, которые могут вызвать процесс образования зародышей, в насосе вместо поршня и цилиндра используется металлический сифон; 2) зародыши в воде образуются в специальной камере, которая находится вблизи всасывающего клапана. Каждый рабочий цикл насоса обязательно

включает в себя несколько секунд, в течение которых вся система выдерживается при положительном давлении 300 бар.

Этот насос, будучи еще очень и очень далек от внедрения в производство, представляет собой пример того, что и как можно делать для получения отрицательных давлений. Он работает безнадежно медленно (всего 6 циклов в минуту), удручает своей неэффективностью (его механическая эффективность составляет доли процента) и очень ненадежен (из-за того, что в воде часто возникают пузырьки, насос приходится наполнять заново). Тем не менее, если представленную схему несколько переработать, то на ее основе можно было бы создать какое-нибудь простое устройство для выкачивания воды из глубоких колодцев, которое пригодились бы развивающимся странам, где стоит проблема создания глубинных насосов.

Существует по крайней мере один случай, в котором умение использовать отрицательные давления является вопросом жизни и смерти. Тысячи людей погибли от жажды, пробираясь сквозь топи и безводные леса, в то время как капилляры деревьев были наполнены пригодным для питья, но недоступным соком. Может быть, придет день, когда среди

оборудования, необходимого для работы в такой местности, появится небольшой карманный шприц отрицательных давлений. С помощью этого шприца путешественник сможет выкачать из древесных капилляров животворную жидкость почти так же легко, как врач берет обычным шприцем кровь из вены больного.

Крайне интересны перспективы применения отрицательных давлений в ирригационных системах, развитые Балмэном⁴⁸. В обычных ирригационных сооружениях происходят значительные потери воды за счет испарения ее из почвы и за счет выделения растениями избыточной влаги. Если бы можно было подавать воду *под контролируемым отрицательным давлением* сквозь систему пористых труб, находящихся под землей, то потери почти полностью исчезли бы. Растения высасывали бы из трубок ровно столько воды, сколько им нужно (и ни капли больше), и она поступала бы к ним по почвенным капиллярам.

Такая система, несомненно, могла бы действовать, если бы кто-нибудь взялся за ее разработку. Может быть, она оказалась бы слишком дорогой, но ведь и единственный возможный в перспективе способ добывания воды — опреснение огромных объемов морской воды, прокачка ее на дальние расстояния, а потом огромные потери из-за неумелого использования — наверняка не будет дешевым. Представляется весьма вероятным, что однажды человеку придется позаимствовать у природы ее собственный метод водоснабжения, основанный на использовании отрицательных давлений. И чем раньше человек поймет, как это сделать экономичнее, тем легче станет жить миллионам голодающих на нашей планете.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. F. M. D o n n y, Acad. Bruxelles 17 (1843), а также Ann. Chim. (Phys.) 16. 167 (1946).
2. O. R e y n o l d s, Mem. Manchr. Lit. Phil. Soc., 232 (1877/1878).
3. O. R e y n o l d s, *ibid.*, 394 (1880/1881).
4. M. B e r t e l o t, Ann. Chim. (Phys.) 30, 232 (1850).
5. R. S. V i n c e n t. G. H. S i m m o n d s, Proc. Phys. Soc. (L.) 55, 376 (1943).
6. J. M e y e r, Abhandl. Bunsen. Ges. 6, 1 (1911).
7. A. T. J. H a y w a r d, Nature 202, 481 (1964).
8. R. S. V i n c e n t, Proc. Phys. Soc. (L.), 53, 126 (1941).
9. B. A. X o x л o в, Изв. АН СССР, ОТН (Энергетика и автоматика) 6. 85 (1961).
10. D. M. Y. P. M a n l e y, Ph. D. Thesis (London University, 1952).
11. R. S. V i n c e n t, Proc. Phys. Soc. (L.) 55 (pt 1), 41 (1943).
12. N. H. V. T e m p e r l e y, L. G. C h a m b e r s, *ibid.* 58, 420 (1946).
13. H. M. B u d g e t t, Proc. Roy. Soc. A86, 25 (1912).
14. C. W e s t. R. H a v l e t t, J. Phys. D1, 247 (1968).
15. R. D. F i n c h, J. Acoust. Soc. Am. 36, 2287 (1964).
16. R. S t r a s b e r g, *ibid.* 31, 163 (1959).
17. D. C. F. C o u z e n s. D. H. T r e v e n a, Nature 222, 473 (1969).
18. H. L. M c B r o o m, Sci. Lubric. 5 (4), 10 (1953).
19. D. F o r t h, Compr. Air and Hydraulic 23 (271), 463. 502. 550 (1958); 24. 61 (1959).
20. R. W. K e r m e e n et al., Trans. ASME 77. 533 (1955).
21. F. P. B o w d e n, M. P. M c O n i e, Nature 206, 380 (1965).
22. L. J. B r i g g s, J. Appl. Phys. 21, 721 (1950).
23. L. J. B r i g g s, *ibid.* 24, 488 (1953).
24. L. J. B r i g g s, *ibid.* 26, 1001 (1955).
25. O. R e y n o l d s, Mem. Manchr. Lit. Phil. Soc. 7 (1882).
26. A. M. W o r t h i n g t o n, Phil. Trans. A183, 355 (1892).
27. H. N. V. T e m p e r l y, Proc. Phys. Soc. (L.) 59, 199 (1947).
28. J. J. D o n a g h u e et al., J. Chem. Phys. 19. 55 (1951).
29. M. G e r n e z, Phil. Mag. 33, 479 (1867).
30. C. T o m l i n s o n, *ibid.* 34, 136, 229, 36, 241 (1867).
31. C. T o m l i n s o n, *ibid.* 45, 276 (1873).

32. E. N. H a r v e y, J. Cell. Comp. Phys. **24**, 1 (1944).
 33. F. E. F o x, K. F. H e r z f e l d, J. Acoust. Soc. Am. **26**, 984 (1954).
 34. W. R. T u r n e r, J. Acoust. Soc. Am. **33**, 1223 (1961).
 35. A. T. Y. H a y w a r d, J. Phys. **D3**, 574 (1970).
 36. A. T. Y. H a y w a r d, Brit. J. Appl. Phys. **18**, 641 (1967).
 37. E. N. H a r v e y et al., J. Am. Chem. Soc. **68**, 2119 (1946).
 38. H. H. D i x o n, J. J o l y, Phil. Trans. **186**, 563 (1895).
 39. P. R. W h i t e, Am. J. Botany **25**, 223 (1938).
 40. M. H. Z i m m e r m a n, Biorheol. **2**, 15 (1964).
 41. P. F. S c h o l a n d e r et al., Science **148**, 339 (1965).
 42. J. A. M i l b u r n, R. P. C. J o h n s o n, Planta **69**, 43 (1966).
 43. J. A. M i l b u r n, New Phytol. **69**, 133 (1970).
 44. J. L. S l i g h, A. B r e n n e r, J. Electrochem. Soc. **110**, 1136 (1963).
 45. B. H a h n, Nuovo Cimento **22**, 650 (1961).
 46. A. S p a d a v e c c h i a, B. H a h n, Helv. Phys. Acta **40**, 1063 (1967).
 47. A. T. J. H a y w a r d, Nature **225**, 376 (1970).
 48. R. B. B u l m a n, Effective Rainfall, Carlisle, Bushby Pros., 1969.
-