

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА КАВИТАЦИИ И МЕХАНИЗМ КАВИТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

И. Меттер

ВВЕДЕНИЕ

В конце прошлого века инженеры-кораблестроители и конструкторы турбин и турбонасосов впервые столкнулись со своеобразным разрушением металлических частей гидравлических машин и лопастей

гребных винтов. Разрушение возникало каждый раз, как только давление в потоке в районе будущего повреждения длительно снижалось до значения упругости пара воды; вместо однородного потока поверхность металла обтекалась смесью воды и водяного пара. Образование пузырей, заполненных паром жидкости, в этих условиях было названо кавитацией («cavitas» — полость).

Кавитация, как правило, приводила к двум последствиям: во-первых, снижался коэффициент полезного действия гидравлического механизма — турбины,

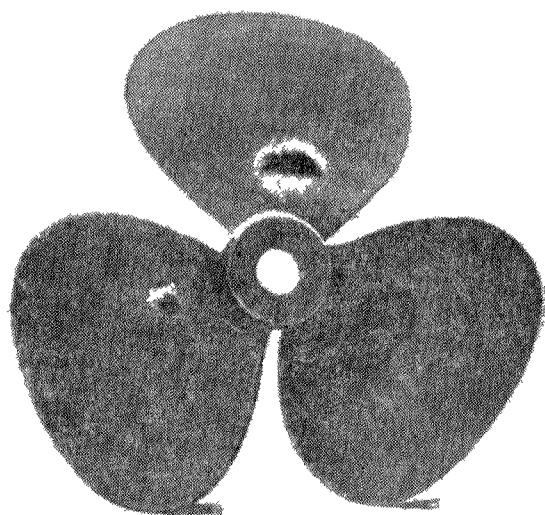


Рис. 1. Кавитационные повреждения лопастей гребного винта.

турбонасоса или гребного винта корабля и, во-вторых, наряду со снижением к. п. д., во всех без исключения случаях обнаруживались повреждения отдельных мест лопаток турбины или лопастей гребного винта (рис. 1). Из-за кавитационных повреждений иногда приходилось

заменять рабочее колесо турбины после нескольких недель работы, а гребной винт корабля после нескольких месяцев плавания. Это имело место, например, на таких крупных кораблях, как «Лузитания» и «Мавритания». Повреждения их винтов захватывали площадь в четверть квадратного метра и проникали в глубь лопасти на 5—7 см. Известны случаи катастрофических разрушений гребных винтов из-за кавитации после нескольких часов работы — на быстроходных судах, например на торпедных катерах. Следует сразу же отметить, что повреждения не похожи на те, которые возникают в результате чисто химического или электрохимического воздействия воды на металл.

На борьбу с кавитацией при конструировании современных сверхмощных турбин и центробежных насосов приходится также обращать специальное внимание. На ДнепроГЭСе пришлось в своё время провести большие гидротехнические вспомогательные работы для устранения или ослабления вредных эффектов, сопровождающих кавитацию.

К сожалению, в течение долгого времени проблеме кавитации не уделялось достаточного внимания. Систематические лабораторные исследования явлений, сопутствующих кавитации, начались лишь с 1922 г. С тех пор опубликовано около ста работ и издано несколько сборников, посвящённых кавитации.

Вначале пытались подойти к проблеме кавитации чисто гидродинамическим путём и принимали во внимание только внешние обстоятельства — скорость потока, давление в нём и зависимость того и другого от времени. Позднее выяснилась необходимость учёта физических условий в жидкости — температуры, плотности, поверхностного натяжения, вязкости, количества растворённого в ней газа и т. д.

Эти факторы, каждый по-своему, влияют на процесс образования пузырей, на их устойчивость и активность воздействия на твёрдую поверхность, возле которой или на которой они возникают.

В настоящем обзоре мы рассмотрим главным образом те работы, которые посвящены выяснению физической природы кавитации и механизму кавитационных повреждений. Что же касается кавитационного сопротивления материалов, то мы ограничимся в конце самыми общими указаниями.

1. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАВИТАЦИИ

В 1850 г. Бертелло¹, повидимому впервые, удалось «растянуть» жидкость. Трубка, из которой предварительно был выкачен воздух, опрокидывалась в чашку со ртутью. Затем трубка с вошедшей в неё ртутью разогревалась до «прилипания» ртути к стеклу. После этого Бертелло медленно охлаждал её. Ртуть при этом не отрывалась от стекла и, значит, была растянута отрицательным давлением, возникшим при охлаждении. Вортингтон² в 1892 г. использовал идею Бертелло и сконструировал прибор («тонометр») для растяжения и измерения растяжения в столбе жидкости. Этиловый спирт Вортингтон

«растянулся» давлением в 17 атмосфер. Воду позднее удалось растянуть до 34 атмосфер, а эфир до 72 атмосфер.

Опыты с растяжением жидкости производил и Рейнольдс. Он вращал *U*-образную трубку с жидкостью и вызывал растяжение действием центробежных сил.

Создавая сначала значительные отрицательные давления во всех таких опытах, можно было затем вызвать «разрыв» столба жидкости на две части, с образованием полости между ними, заполненной паром этой жидкости. Таким образом можно создать кавитационную полость при искусственном растяжении жидкости.

В естественных условиях, в потоке, мы сталкиваемся с растяжением жидкости и с появлением разрывов в ней значительно чаще. Движение стационарного потока подчиняется известному закону Бернулли: для всех поперечных сечений горизонтального потока должна оставаться постоянной сумма

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const.}$$

Очевидно, что в местах сужения потока, где скорость возрастает, давление p внутри жидкости может упасть до 0 и даже принять отрицательное значение. В этих местах жидкость подвергнется растяжению и обнаружит разрывы сплошности — в ней появятся кавитационные, т. е. заполненные паром, пузыри.

Известен классический опыт Рейнольдса: вода, протекая по узкому участку трубки, «закипает» в нём при комнатной температуре; в этом месте идёт бурное образование кавитационных пузырей. Они скалываются в таком количестве, что струя становится из-за них мутнобелой.

Фотографирование потока воды, протекающего через специальную кавитационную трубу (трубу с сужением, диффузор или сопло), при различных скоростях потока — до 180 *км/час* — проводилось в ряде лабораторий^{3,3а} (1914 — 1926 гг.). Было установлено, что кавитационные пузыри могут быть очень маленькими — доли кубического миллиметра, но могут занимать и объём в несколько литров. Возле гребного винта корабля, например, объём кавитационных полостей доходит до нескольких кубических метров.

В 1932 г. Гейнесом⁴ был разработан новый метод создания кавитационных пузырей, чрезвычайно удобный для лабораторных исследований. Заключается он в следующем: в металлическом стержне, длиной 25 см, погруженном в жидкость, создаются с помощью специального генератора магнитострикционные продольные колебания с частотой 9—10 тыс. *гц*. Мощность генератора 250 *вт*. Амплитуда колебаний стержня — десятые или сотые доли миллиметра. Легко убедиться, что ускорение торца стержня в опытах Гейнесса достигало 3000 *г*. Вследствие таких колебаний стержня в жидкости создавалась интенсивная волна сгущений и разрежений. Если в полупериод раз-

режения гидростатическое давление упадёт до упругости пара или ниже, т. е. жидкость окажется растянутой, то в ней может зародиться кавитационный пузырёк. В следующий полупериод произойдёт сжатие его, и, если пузырёк при этом не будет раздавлен, он должен начать пульсировать в такт со звуковыми колебаниями генератора.

В 1935 г. Хансейкер⁵ заснял с помощью киноаппарата с цейтлуп-пой поведение пузырьков. Оказалось, что пузырьки действительно колеблются—сжимаются и расширяются—внутри жидкости.

Опыты Гейнесса показали, что после нескольких минут работы генератора торцовая поверхность никелевого стержня оказывалась повреждённой; причём характер повреждений в точности напоминал обычные кавитационные повреждения.

Интересно отметить, что первые разрушения под действием кавитации, созданной акустическими колебаниями, были обнаружены на мембранных аппаратах подводного телеграфирования. Иногда после нескольких минут работы при частоте 7—8 тыс. гц мембранны выходили из строя.

Таким образом, с возникновением кавитационных пузырей мы сталкиваемся либо при чисто механическом растяжении жидкости, либо при подходящих гидромеханических условиях в потоке, или же, наконец, под влиянием акустических колебаний в объёме жидкости.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИИ

Известны четыре различных метода изучения кавитации и вызываемых ею последствий:

- Исследования в кавитационных трубах или диффузорах^{3, 6, 7}.
- Удар струи или капель^{8, 9, 10}.
- Метод ударных волн¹¹.
- Метод Гейнесса⁴.

Приведём краткую характеристику этих методов.

а) Опыты в диффузорах с большой высотой напора (до 350 м) производились начиная с 1932 г. Шретером⁶. Шретер сконструировал диффузор (рис. 2), в котором при помощи простого приспособления—выдвижения винта—можно было менять сечение потока в самом диффузоре. Это давало возможность создавать многочисленные кавитационные пузырьки, которые проносились потоком над укреп-

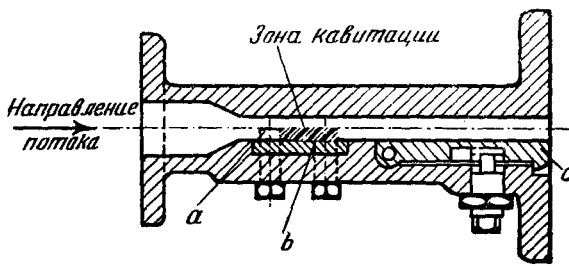


Рис. 2. Схема диффузора для изучения кавитации:
а — выступающий винт, вызывающий кавитацию;
б — испытуемый образец (60 × 30 × 8 мм); с — дроссель.

лённым в трубе образцом из испытуемого материала. Позади образца находился дроссель, который, создавая противодавление, регулировал выпуск воды из прибора. С помощью такого дросселя можно было по желанию менять распределение давления в трубе и тем самым перемещать внутри трубы область конденсации пузырей. Исследования показали, что разрушение поверхности образца всегда наблюдается в зоне конденсации пузырей, т. е. там, где они смыкаются, а не в том месте, где они зарождаются (где давление минимально) — см.

рис. 3. Винт, который вызывал кавитацию и находился всё время в зоне пониженных давлений (зона *ab* на рис. 3), никогда никаких повреждений не испытывал.

Хансейкер⁵, проводя исследования, в кавитационной трубе при помощи цейтрупа обнаружил периодический характер кавитации. Он наблюдал возникновение, нарастание и ослабление кавитации, причём весь этот цикл занимал тысячные доли секунды.

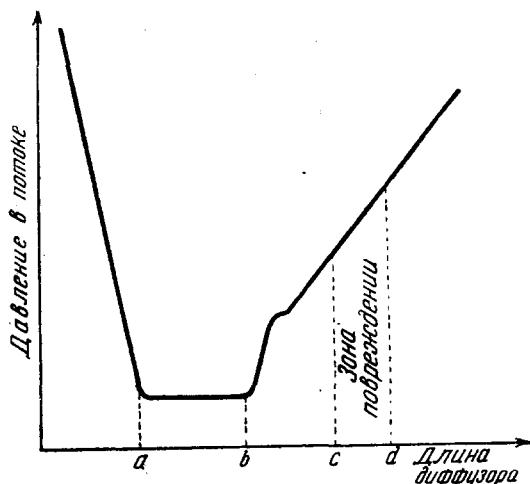
Что касается внешнего вида образцов,

Рис. 3. Изменения давления по длине диффузора и расположение зоны повреждений.

повреждённых в диффузорах или в кавитационных трубах, то их поверхность напоминала мишень при неточной стрельбе: сначала появляются несколько разбросанных попаданий, а затем поверхность испещряется следами от кавитационных ударов.

Значительность повреждений, возникающих от кавитационных ударов, удобно оценивать по потере веса образца, подвергшегося кавитационным воздействиям. Кривые потери веса в функции времени показаны на рис. 4¹². Мы видим, что во всех случаях требуется «инкубационный период» (иногда превышающий 10—20 час.), прежде чем появятся повреждения, сказывающиеся на потере веса. После «инкубационного периода» потеря веса следует линейному закону, причём тангенс угла наклона может служить мерой скорости повреждения.

б) Совершенно такие же заключения были получены и в опытах со струёй воды, направленной на металл^{8, 9, 10, 13}. Образец закреплялся в виде стержня на ободе колеса, приводившегося в быстрое вращение. Узкая струя воды направлялась перпендикулярно плоскости



колеса. При каждом обороте образец пересекал струю. При относительной скорости струи и образца в 200 м/сек и диаметре струи в 1,5 мм наиболее твёрдые материалы обнаруживали характерную эрозию, совершенно сходную с повреждениями при кавитации.

Кривые потери веса образцов, подвергнутых ударам струи, имеют точно такой же вид, как и при испытаниях в кавитационной

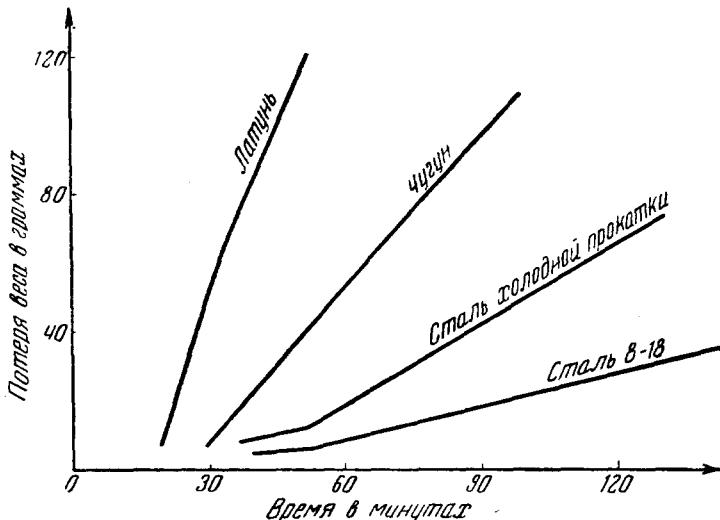


Рис. 4. Потеря веса образцов, сделанных из различных материалов, вызванная кавитационными повреждениями, в функции времени кавитации.

трубе или диффузоре^{3а,7}. И здесь, прежде чем появится первое повреждение, должно пройти некоторое время («инкубационный период»). Только после миллионов ударов струи образец начинает заметно терять в весе (рис. 5).

в) Акерер и Галлер¹¹ в 1938 г. исследовали разрушение металлов ударными волнами. Прибор представлял собой толстостенный стальной цилиндр, сходящийся внизу на конус и заполненный водой. В цилиндре находился поршень, плотно прилегавший к поверхности воды. Специальное приспособление ударяло по поршню 16 раз в секунду. У основания конуса располагался исследуемый образец или пьезокварц для измерения давления. Вода в цилиндре находилась под давлением в 7 ат, что, по мнению авторов, устранило возможность возникновения кавитации. При каждом ударе по поршню ударная волна передавалась через жидкость к образцу, и через 10—12 час. работы, т. е. после 60 000 ударов такого «гидравлического молотка», явно обнаруживались повреждения, сходные с кавитационными.

Пьезокварц в этих опытах зарегистрировал сравнительно небольшие давления, как раз такие, какие должны возникнуть при гидравлическом ударе.

Микроскопическое исследование чугунного образца, испытанного в этом приборе, показало, что вкрапления графита размером 0,001 мм выбивались из поверхности после нескольких тысяч ударов. Заметим, что для выбивания зёрен графита не нужны высокие давления—давления, развивающиеся в приборе при гидравлическом ударе, вполне достаточны.

Вероятно, после того как образуются микроскопические трещины на «слабых местах» поверхности, дальнейшие повреждения облегчаются; вода в углублениях работает как клин.

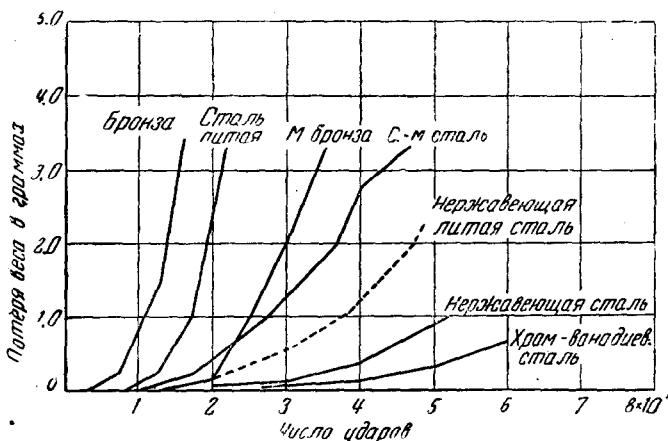


Рис. 5. Потеря веса образцов, сделанных из различных материалов, в функции числа ударов струи. (Относительная скорость 77 м/сек, диаметр струи 8 мм.)

Опыты с другими металлами, поставленные в этом приборе, дают не столь ясную картину повреждения. Но и в этих случаях можно ожидать, что самые незначительные дефекты поверхности, не проявляющие себя при грубых испытаниях на усталость, играют роль «слабых мест» при воздействии ударной волны. Именно из этих мест и выбиваются (в результате нескольких тысяч ударов) мельчайшие осколки, после чего все последующие удары становятся эффективнее. Следует указать, что некоторыми авторами ставится под сомнение отсутствие кавитации в приборе Аккерета и Галлера: в полупериод разрежения в ударной волне вполне возможно зарождение кавитации.

Таким образом, для всех рассмотренных методов исследования кавитационных повреждений существенной является периодичность процессов, сопровождающих кавитацию. Для диффузора или кави-

тационной трубы частота этих процессов порядка сотен герц; для ударов струи — периодичность задаётся числом оборотов колеса; в случае ударных волн в приборе Аккерета речь шла о 16 герцах; в приборе Гейнесса, как уже говорилось, можно осуществить частоты порядка многих тысяч герц.

г) Особенno удобен для изучения чисто физических особенностей кавитации метод Гейнесса⁴. Длительность опыта невелика. Прибор требует небольшого количества воды и незначительной мощности, позволяя в то же время легко фотографировать весь процесс в целом и следить за поведением отдельных пузырей. Переход от одной жидкости к другой осуществляется весьма просто. Зависимость от

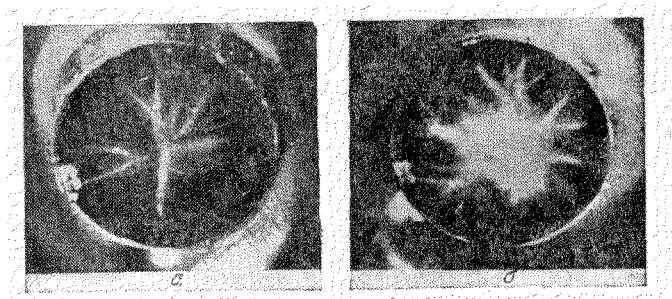


Рис. 6. Образование пузырей на поверхности колеблющегося образца: *a* — при малой амплитуде колебаний, *b* — при большой амплитуде ($\sim 0,015$ мм).

температуры, давления и т. д. может быть изучена без особых трудностей.

Наконец, он позволяет сопоставлять картину образования пузырей у поверхности кавитирующего образца с характером повреждений поверхности. Всё это послужило причиной того, что в последнее время метод Гейнесса нашёл широкое применение для исследования кавитационных процессов.

Проследим вначале по работе Корнфельда и Суворова¹³ за тем, как влияет амплитуда колебаний образца на поведение кавитационных пузырей. При амплитуде колебаний порядка 0,005 мм на поверхности образца появляются воздушные пузырьки, которые медленно перемещаются по поверхности. Если генератор выключить, пузырьки остаются видимыми в жидкости; это свидетельствует о том, что они заполнены воздухом.

При больших амплитудах, начиная с 0,01 мм, на поверхности колеблющегося стержня появляется беловатое облачко. Оно состоит из скопления быстро движущихся пузырьков (рис. 6). Облачко полностью исчезает, как только генератор прекращает работу. Это указывает на кавитационное происхождение пузырьков. Опыты показа-

ли, что такое облако через 20—30 мин. после своего появления вызывает повреждение поверхности как раз в том месте, над которым оно образовалось. Если облако пузырей переместить по поверхности, то соответственно перемещается место повреждения образца.

При ещё большем увеличении амплитуды, до 0,015 *мм*, облако становится ещё более отчётливым; в его центре появляется белый пузырь диаметром 1—2 *мм*. Следует отметить, что образование пузырей при этой амплитуде сопровождается резким, неприятным свистом*).

Кавитация при таком режиме работы генератора создаёт наибольшие повреждения. Через 30—40 секунд (а не минут, как прежде) в центре алюминиевого образца образуется отверстие диаметром 1,5 *мм* и глубиной до 1 *мм*. Аналогичные результаты были получены Корнфельдом и Суворовым для других металлов, стекла и резины.

В некоторых случаях нельзя судить о повреждениях по потере веса, так как возле углубления на поверхности металла образуется бугорок в форме кратера: повреждение явно налицо, а вес не только не убавился, а иногда возрос вследствие образования плёнки окисла металла.

Поэтому, наряду с потерей веса, в дальнейшем мы будем принимать во внимание также внешний вид поверхности и результаты микроскопического и рентгеновского анализа.

3. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ВОДЕ, ВОДНЫХ РАСТВОРАХ И В ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ

Образец, колеблющийся в воде при комнатной температуре, обнаруживает область повреждений в виде круга около центра образца. Было замечено, что кавитационные пузыри захватывают область, перемещающуюся при повышении температуры воды от центра образца к его периферии. Соответственно этому и повреждения, сопровождаемые при низкой температуре воды в центре, при 50—60° приобретают кольцеобразный характер, при ещё более высоких температурах ослабевают и при 100° исчезают совершенно. Эта картина не зависит от материала образца. Повреждения при различных температурах воды показаны на рис. 7¹⁴ и 8¹².

Анализ фотографий приводит к заключению¹⁴, что картина повреждений поверхности всегда находится в соответствии с характером и активностью кавитации непосредственно над повреждённым местом. При недостаточном темпе образования пузырей или при полном их отсутствии повреждений не наблюдается вовсе.

*.) Шум и свист, сопровождающие захлопывание пузырьков, имеют место и при закипании воды. Рейнольдс этим объяснял „пение“ чайника, поставленного на огонь. По этой же причине, повидимому, журчат ручейки и „поют“ водопроводные трубы. См. Raynolds Scient. Papers, 2, 578 (1894).

Исследования кавитации в водных растворах поваренной соли, перекиси водорода (3%) и едкого калия (0,01 нормального) не показали значительного отличия её характера и условий возникновения от характера и условий возникновения кавитации в дистиллированной воде или в воде из водопроводного крана. Это и понятно, так как упругость пара слабого раствора мало отличается от упругости пара растворителя, поэтому и характер образования пузырей сходен в обоих случаях. Это же относится и к характеру повреждений (рис. 9)^{12, 14}. Полная потеря веса после 10 мин. работы генератора оказалась наибольшей при температуре около 50°, как и в чистой воде.

Для того чтобы исследовать влияние физических свойств жидкости на характер кавитации в ней, надо было перейти к жидкостям, которые сильно различаются по упругости пара, вязкости и поверхностному натяжению. С этой целью были поставлены опыты¹⁴ в бензине, бензоле и этиловом эфире при температуре 26°. В качестве образца служил алюминий — для него длительность опыта оказалась наименьшей. Результаты видны на рис. 10.

Усматривается полная аналогия с результатами, представленными на предыдущих фотографиях: области повреждения на образцах соответственно сходны с теми, какие были получены в случае воды при температуре 20, 60 и 90°. Следует обратить внимание на то, что при этих температурах упругости паров воды равны 17, 150 и 525 *мм*, а при температуре 26° бензин имеет упругость пара 16 *мм*, бензол 100 *мм* и этиловый эфир 500 *мм*.

В этиловом эфире образец долгое время не обнаруживал макроскопических повреждений, но под микроскопом были заметны следы слабого воздействия на металл. Здесь мы имеем картину такую же, как и в воде при температуре, близкой к температуре кипения.

Опыты с органическими жидкостями¹⁴ показали, что при различных температурах, но при одной и той же упругости пара, в различных жидкостях внешний вид повреждения подобен: маленькое повреждение в центре образца при давлении до 100 *мм* расширяется по мере увеличения упругости пара и приобретает вид кольца, охватывающего центр образца. При приближении к температуре кипения для каждой жидкости кавитационное воздействие на металл ослабевает. Мы ещё раз убеждаемся, что первичные процессы, которые ответственны за кавитационное повреждение, требуют наличия двойной фазы: жидкость и её пар должны существовать одновременно. Причём должно ити образование устойчивых пузырей, сидящих на определённых местах образца или медленно перемещающихся по его поверхности. Интересен, с этой точки зрения, следующий опыт¹⁴. По поверхности кавитационного образца при помощи проволочки медленно перемещается пузырёк диаметром 0,5 *мм*. В точном соответствии с траекторией перемещения пузырька, на поверхности металла обнаруживаются повреждения. Наблюдения за кавитационными пузырьками в приборе Гейнса показали, что пузырьки

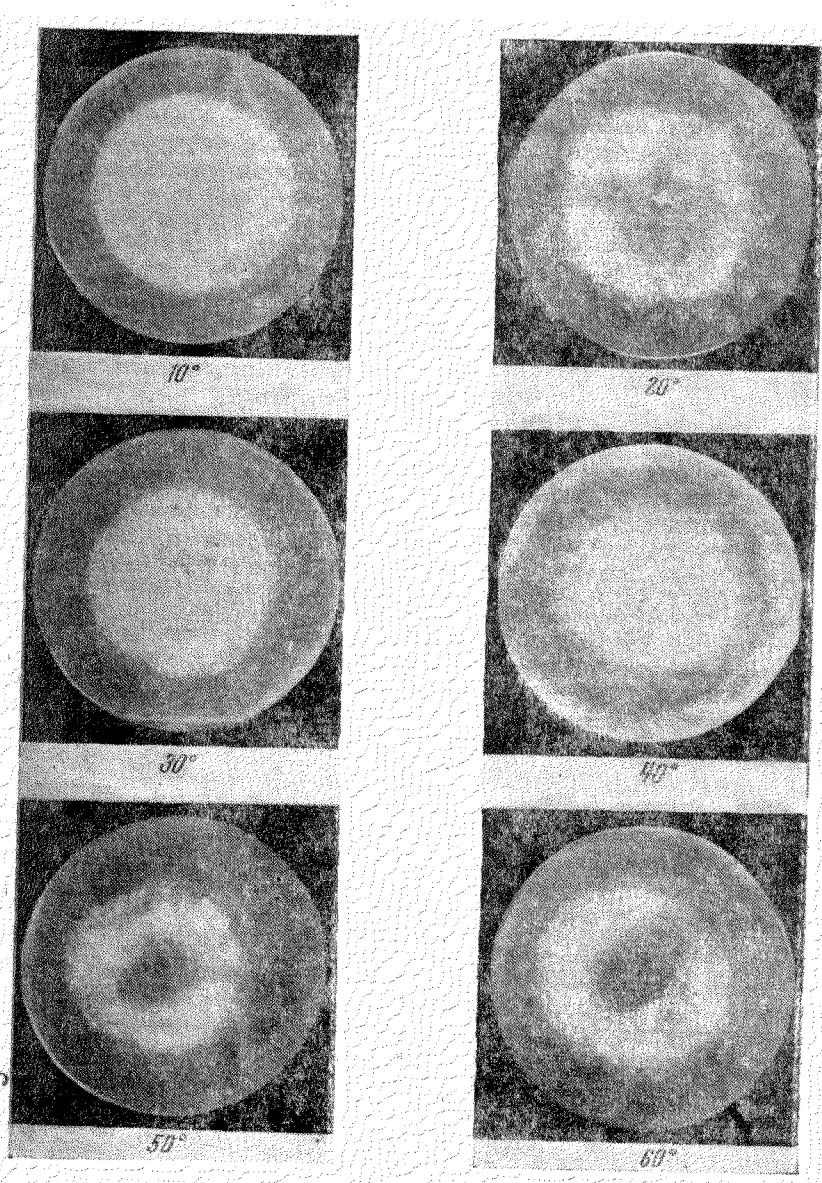


Рис. 7. Кавитационные повреждения алюминия при различных температурах воды. Время кавитации — 1 мин.

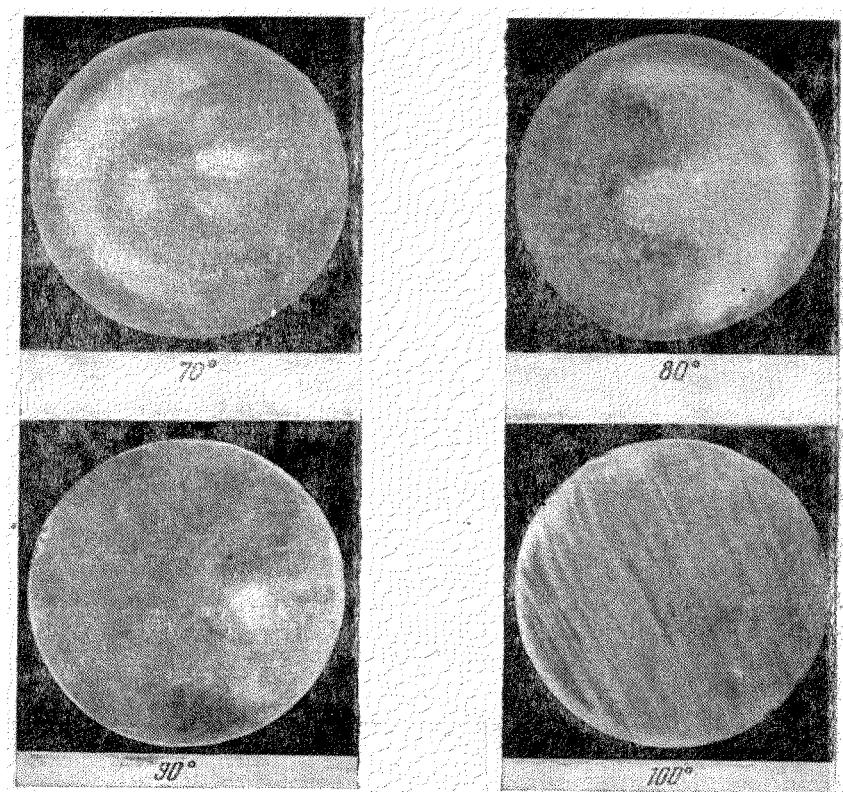
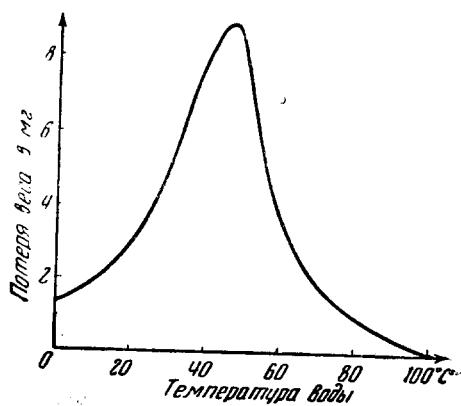


Рис. 7 (продолжение). Кавитационные повреждения алюминия при различных температурах воды. Время кавитации — 1 мин.

Рис. 8. Зависимость потери веса образца магния от температуры воды. Время кавитации — 10 мин. Амплитуда — 0,06 м.м.



сами путешествуют по поверхности, причём перемещение происходит скачками. Особенно отчётливо это видно в жидкостях с большой вязкостью (впрочем, и в воде при достаточно малых амплитудах колебания). Скорость перемещения, как показали наблюдения, невелика — несколько сантиметров в секунду.

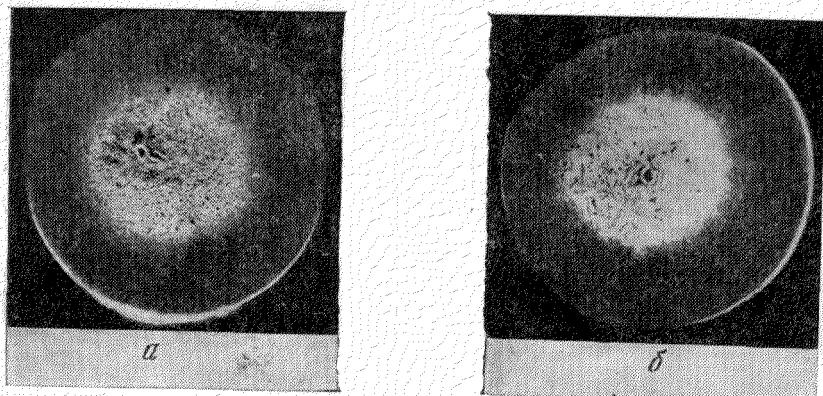


Рис. 9. Кавитационные повреждения алюминия в водных растворах: *а* — в 30% растворе перекиси водорода, время кавитации — 3 мин.; *б* — в растворе NaCl (0,01 норм.), время кавитации — 1 мин.

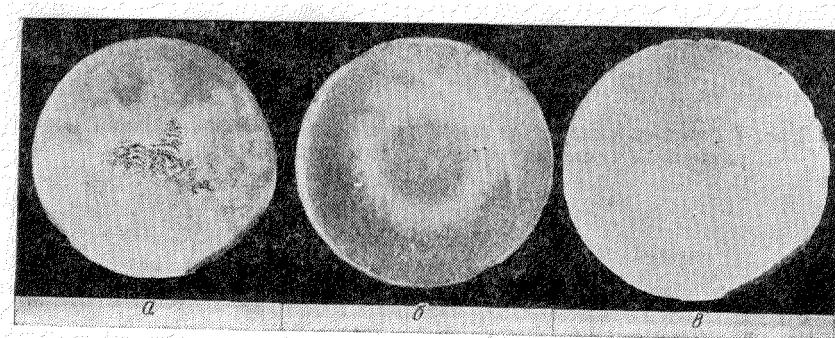


Рис. 10. Повреждения алюминия после 17 мин. кавитации: *а* — в бензине, *б* — в бензоле, *в* — в этиловом эфире.

Микроскопическое исследование поверхностей образцов, кавитировавших в воде, иногда обнаруживает линейчатый характер повреждений: следы от повреждений расположены почти вдоль прямых линий¹⁴ (рис. 11, 12). Это хорошо согласуется со скачкообразным характером движения пузырьков по поверхности. Интересно, что и в

опытах с кавитационной трубой на образце заметны следы перемещавшихся пузырей (рис. 13).

Можно попытаться рассчитать скорость перемещения, пользуясь фотографией, представленной на рис. 11, и исходя из предположе-

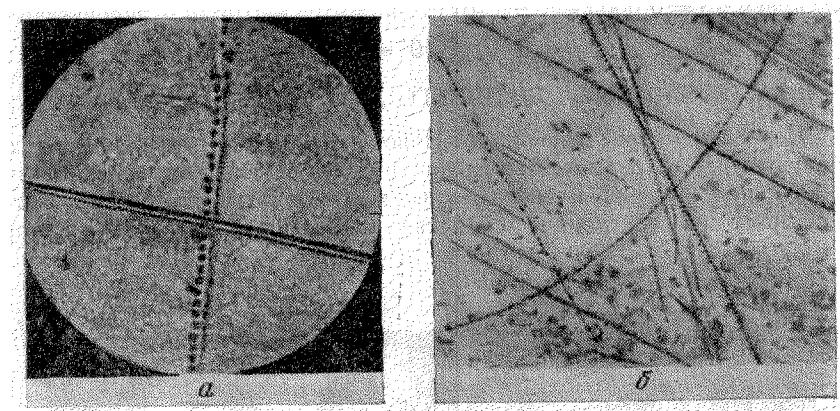


Рис. 11. Микроповреждения латуни после кратковременной кавитации в воде, имеющие линейчатый характер; *а*—уменьшено в 400 раз, *б*—уменьшено в 1200 раз.

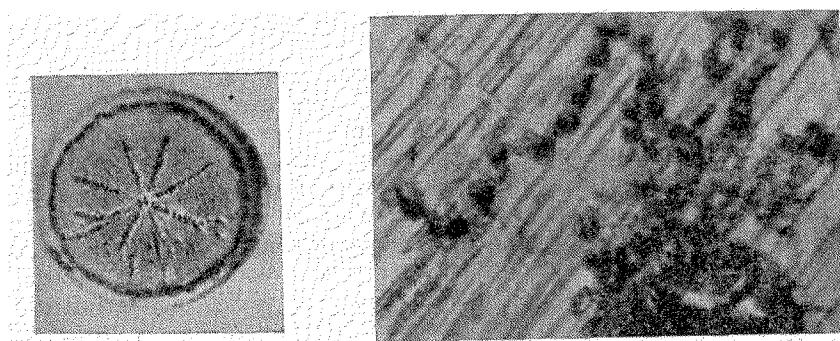


Рис. 12. Линейчатые повреждения поверхности никеля при кавитации в воде.

Рис. 13. Линейчатые микроповреждения высоколегированной стали после кавитации в диффузоре.

ния, что пузырьки, стягиваясь и расширяясь в такт с колебаниями генератора, при каждом сокращении воздействует на поверхность металла. Такое предположение, как мы увидим, имеет достаточно оснований.

Будем считать, что расстояние ΔS между двумя соседними следами пузырька на фотографии представляют собой путь пузырька за время одного колебания. Тогда скорость его $v = \frac{\Delta S}{\Delta T} = \Delta S f$, где f — частота генератора. Учитывая увеличение фотографии в 400 раз, мы имеем $\Delta S = 0,0003$ см. Частота генератора — 10^4 гц. Следовательно,

$$v = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4 = 3 \text{ см/сек.}$$

4. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Перейдём к описанию опытов Новотни¹⁴ при различных давлениях и температурах. Прежде всего рассмотрим результаты опытов с латунью в воде при 80° , 90° и 100°C , при давлении в 2 ат. Автор работы указывает на следующее сходство: образец после кавитации при

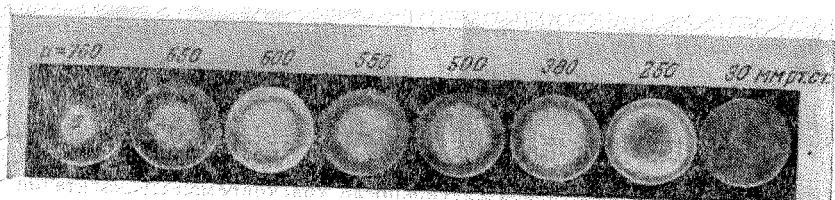


Рис. 14. Поверхность алюминия после 10 мин. кавитации в воде при различном внешнем давлении.

100° и 2 ат выглядит так же, как и после кавитационного воздействия при 60 — 70° и при атмосферном давлении. Аналогично, снимок, соответствующий 80°C и давлению в 2 ат, сходен со снимком при комнатной температуре. Новотни подчёркивает решающую роль, которую играет соотношение между внешним давлением и упругостью пара.

Для проверки этого утверждения им были поставлены исследования с кавитирующим алюминиевым стержнем в воде при комнатной температуре, но при пониженном давлении. Результаты представлены на рис. 14.

При $P = 760$ мм картина тождественна изображённой на рис. 7 при 20° . Повреждения же при давлении $P = 380$ мм напоминают повреждения при атмосферном давлении, но при температуре 70 — 80° **).

Таким образом, характер воздействия кавитационных пузырей на образец зависит существенно от разности ($P_{\text{внешне}} - P_{\text{пара}}$).

Правило, согласно которому при $P_{\text{внешне}} - P_{\text{пара}} = 0$ нет повреждений, и здесь выполняется (см. самую правую фотографию на рис. 14).

Мы можем теперь понять, почему в кавитационной трубе повреждения зарегистрированы не в тех местах, где давление снижается

**) Различие в интенсивности объясняется тем, что опыты при пониженном давлении длились 10 мин., а при атмосферном давлении — 1 мин.

до упругости пара (т. е. там, где усиленно образуются пузыри), а в том месте, где давление несколько возрастает (см. рис. 3): только там, где разность давлений $P_{\text{внешнее}} - P_{\text{пара}}$ достаточно велика, создаются условия для успешного развития первичных процессов, приводящих к повреждению.

Сама по себе температура жидкости, в которой происходит кавитация, не даёт возможности делать заключения об ожидаемом повреждении. Важно знать, как мы видели, какова разность между внешним давлением и упругостью пара. Однако зависимость между характером повреждения и этой разностью осложнена рядом побочных факторов и не могла быть выявлена в чистом виде. Среди этих факторов наиболее существенную роль, повидимому, играет поверхностное натяжение.

5. ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Для того чтобы оценить роль поверхностного натяжения, были взяты жидкости с сильно различающимися коэффициентами поверхностного натяжения σ и близкими вязкостями и упругостями пара. Таблица I показывает, что влияние поверхностного натяжения кавитирующей жидкости на процесс разрушения образца весьма велико.

Таблица I

	Плот- ность, ($\text{г}/\text{см}^3$)	Темпера- ттура ($^{\circ}\text{C}$)	Давл. пара (мм)	Вяз- кость ($\frac{\text{г}}{\text{см}/\text{сек}}$)	σ (дин/см)	Уменьш. объёма образца вследст- вие его разруше- ния (см^3)
<i>n</i> -бутанол .	0,80	0	20	0,015	22	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Вода . . .	1,00	23	22	0,01	70	$7,4 \cdot 10^{-4}$

Потери веса образца в зависимости от величины σ представлены на кривой рис. 15. Мы видим, что с увеличением σ растёт и потеря веса.

Оценить влияние вязкости представляется несравненно более трудным, так как большинство вязких жидкостей имеет малую упругость пара, в то время как потери существенно зависят от разности ($P - P_{\text{пара}}$). Результаты опытов¹⁴, представленные на рис. 16, позволяют думать, что при оценке активности кавитационного воздействия вязкость является фактором сравнительно мало существенным.

6. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Первая попытка построить теорию разрушающего действия кавитации принадлежит Куку¹⁵. Его идея заключалась в следующем: при

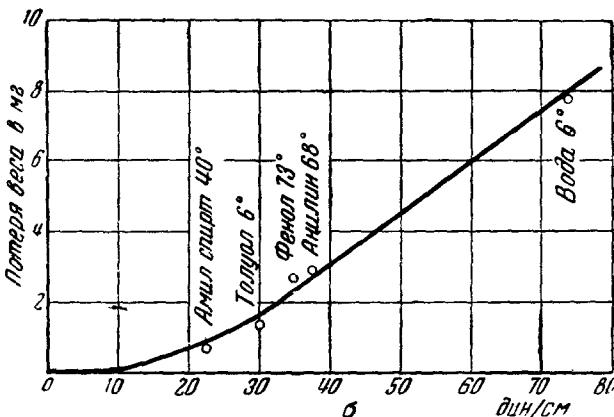


Рис. 15. Зависимость потери веса образца от коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

стягивании кавитационного пузыря вода непосредственно ударяет по поверхности металла и тем самым повреждает поверхность. Кук под-

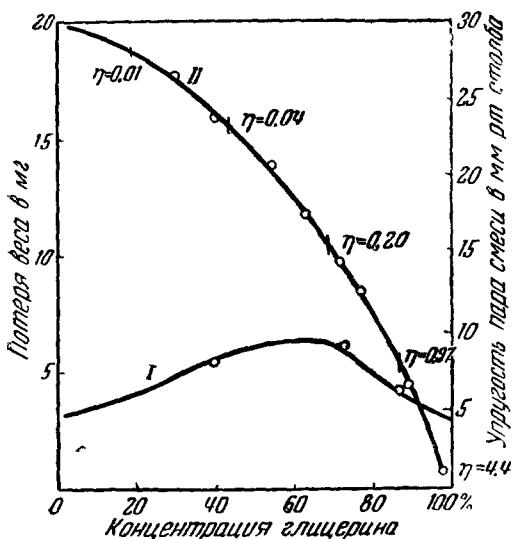


Рис. 16. Потеря веса алюминия после 20 мин. кавитации в смеси глицерин — вода при 28° С в функции концентрации глицерина (кривая I, левая шкала). Кривая II (правая шкала) показывает соответствующее изменение упругости пара смеси. Цифры на кривой II указывают вязкость смеси.

считал давление, которое должно возникнуть на поверхности металлического шарика заданного радиуса, находящегося в центре стяги-

вающегося пузыря в тот момент, когда вода, «вливаясь» внутрь пузыря, достигнет поверхности шарика (рис. 17). Но случай, который рассматривал Кука, нереален. На самом деле кавитационный пузырёк или сидит на поверхности, или находится вблизи от неё (рис. 18). В таком случае гидравлический удар будет иметь место при полном замыкании пузырьков. Формулы Кука непригодны для этого случая — при $r \rightarrow 0$ они приводят к бесконечным значениям давления.

Рэлей¹⁶ в 1917 г. попытался устраниТЬ затруднения теории Кука, показав, что значительные давления должны возникать в самой жидкости вблизи от замыкающегося кавитационного пузырька. По Рэлею, нет необходимости в ударе жидкости о поверхность металла. Достаточно, если стягивающийся пузырёк находится в зле твёрдой поверхности.

Предполагая, что жидкость несжимаема, не учитывая вязкости её и считая, что пузырёк не содержит газа, Рэлей приходит к следующим результатам: скорость стягивания поверхности пузырька равна

$$u = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P}{\rho} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right)}.$$

Здесь R_0 — начальный радиус пузырька, R — радиус в данный момент времени, P — давление в жидкости, ρ — плотность её. Время полного замыкания пузырька («стягивания в точку»), по Рэлею, даётся формулой

$$\tau = 0,91 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P}}.$$

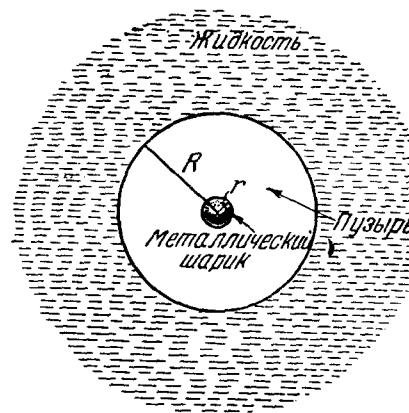


Рис. 17.

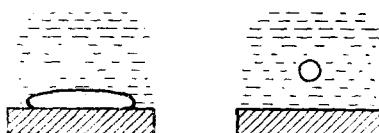


Рис. 18.

Легко убедиться, что при начальном радиусе пузырька $R_0 = 1 \text{ мкм}$ время его замыкания составляет 10^{-4} сек. Давление, возникшее в окрестности пузырька, достигает максимума на расстоянии $1,57 R_0$ от центра и равно там

$$P_{\max} \approx 0,163 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 P.$$

Таблица II иллюстрирует результаты теории Рэлея;

Можно воспользоваться значениями для скорости стягивания пузырька по Рэлею и подставить её в формулу Кука для давления, возникающего при ударе о твёрдую поверхность заключённого в пузырьке шарика

$$P_{\text{по Куку}} = u \sqrt{\rho \cdot \beta} = \sqrt{\frac{2}{3} P \beta \left(\frac{R_0^3}{R^6} - 1 \right)},$$

где β — модуль сжатия воды. Четвёртый столбец в таблице II даёт значения $P_{\text{по Куку}}$, вычисленные по этой формуле.

Численные значения скоростей и давлений, приведённые в таблице II, несомненно превосходят истинные значения. Теория Рэлея не учитывает вязкости и сжимаемости жидкости. Необходимо также принять во внимание наличие пара и газа внутри пузыря. Последнее обстоятельство было учтено Рэлеем, предположившим адиабатичность

Таблица II

$\frac{R_0}{R}$	$u \text{ м/сек}$	$P_{\text{макс в atm}}$ (по Рэлею)	$P \text{ в atm}$ (по Куку)
3	57	8	800
5	130	40	1 700
10	580	300	5 500
20	1000	2 500	14 500
50	4000	40 000	57 000

сжатия находящегося в пузырьке газа, что привело к некоторому снижению скорости стягивания пузырька, а значит и возникающего вблизи него давления. Однако такое предположение является чрезвычайно грубым. Таким образом, теория Рэлея, указывая на возможность возникновения больших давлений вблизи сжимающихся пузырьков, не в состоянии дать конкретную величину давления с учётом всех физических факторов, играющих роль при кавитации.

Аkkerет¹⁷ в 1930 г. исходил из предположения, что пузырьков, зародившийся в быстром потоке жидкости и попавший вслед за тем в область повышенного давления, испытывает резкое сжатие. Давление и температура не конденсирующегося газа внутри пузыря должны при этом значительно возрасти. Для того чтобы вычислить их, надо знать, как идёт конденсация горячих паров при быстром сжатии пузырька, а также располагать сведениями о теплоотдаче через поверхность пузырька. Приблизительные подсчёты, в предположении адиабатического сжатия пузыря, были сделаны Аkkerетом: для одного случая он получил давление 2500 atm и температуру внутри пузыря 2000° К.

Маринеско¹⁸ сделал попытку непосредственно измерить температуру пузырей, для чего пользовался набором взрывчатых порошков, не смачиваемых жидкостью. Порошки с различной, но известной температурой воспламенения подавлялись к кавитирующей жидкости, и

по вспышке порошка определялась температура пузырей. Она оказалась равной 230° С.

Несколько работ было посвящено изучению свечения кавитационных пузырей^{19, 20, 21}. Френкель²¹ показал, что свечение является, повидимому, следствием баллоэлектрического эффекта: оно вызвано электрическим разрядом, который имеет место в «атмосфере» кавитационного пузыря в момент его образования.

Смит²² теоретически исследовал вопрос о возможности разрушающего действия пузырьков газа, пульсирующих в поле интенсивной звуковой волны. Когда такая волна идёт в жидкости, часть растворённого в ней газа выделяется в виде маленьких пузырей. Беспорядочно двигаясь, они увеличиваются в размерах частично из-за адсорбции газа из жидкости, частично же из-за слияния с другими пузырями. На одной из стадий своего роста пузыри проходят через короткий период большой активности — они особенно резко и быстро перемещаются в жидкости. Затем, несколько успокоившись, они достигают 1—2 м.м. в диаметре, всплывают на поверхность и улетучиваются в атмосферу.

Смит показал, что маленькие пузырьки газа в жидкости в поле звуковой волны колеблются, как резонансная механическая система, обладающая одной степенью свободы. Так как пузырёк мал по сравнению с длиной звуковой волны, переменное давления в волне действует почти равномерно на всю поверхность пузыря, поэтому он колеблется почти радиально. Учитывая действие сил инерции и «радиационного трения», Смит приходит к заключению, что когда радиусы пузырьков немного меньше резонансных, давление возле поверхности пузырька может возрасти до 15 000 ат. Что касается величины резонансных радиусов, то они приведены в таблице III (по Смиту).

Таблица III

Частота в гц	10^3	10^4	10^5	10^6
Резонансный радиус в м.м	3,3	0,33	0,033	0,0033

Вероятно, период наиболее активного поведения пузырьков совпадает с моментом, когда их радиусы очень близки к резонансным. Предметы, находящиеся в контакте с такими пузырьками, могут подвергнуться большим напряжениям и оказаться повреждёнными.

Заключения Смита о возможности возникновения повреждений вследствие пульсации воздушных пузырьков резонансных размеров,казалось, могли быть использованы и для объяснения разрушающего действия кавитации. Действительно, в жидкости при любых усло-

виях растворён газ, вследствие чего кавитационные пузырьки, пульсирующие, скажем, в приборе Гейнесса, над кавитирующей поверхностью, заполнены смесью пара и газа. При резком сокращении пузырька пар конденсируется, а газ оказывается сжатым.

Но дело в том, что колеблющийся пузырёк, как показали опыты Корнфельда и Суворова¹⁸, сокращаясь, теряет устойчивость формы. Он сохраняет форму шара только до тех пор, пока радиус уменьшается в 3—5 раз, после чего пузырёк резко деформируется. В частности, если пузырёк сидит на поверхности металла, он может разделиться на части. Представление о последовательных стадиях этого деления схематически даёт рис. 19.

Нарушению сферической формы пузырька может быть дано следующее качественное объяснение. Сферическая форма пузырька обычно обеспечивается преобладающим действием сил поверхности натяжения. При сравнительно больших амплитудах колебания гидродинамические силы могут превысить силы поверхностного натяжения, и пузырёк может обнаружить совершенно неожиданное изменение формы.

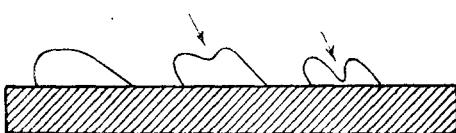


Рис. 19. Последовательные изменения формы кавитационного пузыря при его сжатии.

Таким образом, выводы Смита, основанные на предположении о сохранении формы пузыря вплоть до размеров 0,003 *мм*, оказываются несостоительными.

С этой же точки зрения неправдоподобным является и механизм разрушений по Рэлею: если можно говорить лишь о пятикратном уменьшении радиуса пузыря, то, по теории Рэлея, следует ожидать появления давлений всего лишь в несколько десятков атмосфер, которых явно недостаточно для объяснения разрушающего действия кавитации.

Корнфельд и Суворов¹⁸ указывают, далее, на то, что в моменты сплющивания кавитационных пузырей, пульсирующих на твёрдой поверхности образца, происходят повторные удары воды о поверхность образца, которые и вызывают повреждения. Это тем более правдоподобно, что между повреждениями при кавитации и под ударом струи воды, как мы видели, имеется явное сходство. На рис. 19 направление ударов воды указано стрелками.

Корнфельд и Суворов¹⁸ повторили опыты с пересечением струи, при скорости вращения образца около 50 *м/сек*. Понадобилось 400 000 оборотов диска, чтобы на поверхности алюминия появились заметные повреждения в виде маленьких углублений. Вид и размер углублений очень сходны с теми, какие появляются в центре колеблющегося алюминиевого образца (при амплитуде 0,015 *мм*), спустя минуту после возникновения кавитационных пузырей, т. е. после, примерно, 400 000 колебаний образца.

Исходя из этого, Корнфельд и Суворов считают, что для исследования кавитационной стойкости или прочности материала не нужны устройства типа диффузора Шротера или сложные магнитострикционные приспособления; так как причиной разрушения являются удары воды — достаточно вращающегося колеса с образцом и струи воды.

7. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ПРИ КАВИТАЦИИ

Наиболее старым является представление, что причины повреждений при кавитации имеют чисто химическую природу. На границе металла и жидкости непрерывно идут химические или электрохимические процессы, вызывающие коррозию. Кавитация ускоряет эти процессы, порождая выделение газов, повышение температуры и давления. Роль потока, с этой точки зрения, сводится лишь к удалению продуктов коррозии.

Опыты в кавитационной трубе¹⁴ действительно показывают, что на поверхности образцов, в тех местах, где происходит периодическое замыкание кавитационных пузырей, появляются явно выраженные «цвета побежалости». Это обнаружено на бронзовых, латунных, чугунных и стальных образцах. В некоторых случаях невооружённым глазом можно было видеть оксидные и гидроксидные плёнки на металле. Они были такой толщины, что давали интерференционную синюю окраску поверхности. При небольшой длительности опыта плёнку легко было отделить от поверхности. При более длительном кавитационном воздействии оксидная плёнка оказалась крепко связанной с металлом. Внешний вид поверхности после таких опытов напоминал поверхность металла, разогретого на воздухе до высокой температуры.

Особенно рельефно выступает эта картина на кадмievых образцах. Вокруг повреждённого места, которое в виде кратера возвышается на поверхности, ясно видна коричневатая кайма, представляющая собой тонкий слой окисла кадмия. Рентгенографический анализ подтверждает это заключение.

Однако взгляд на химические процессы, как на основную причину повреждений при кавитации, не находит себе подтверждения. Химические процессы только сопровождают основной механизм воздействия на материал, подготавливая поверхность образца к последующему более лёгкому повреждению и тем самым ускоряют самый процесс разрушения. Известно, например, что образец из чистого магния за время кавитации, меньшее чем 0,5 сек., обнаруживает сильные пластические деформации в отдельных точках поверхности. Даже на стали, значительно более стойкой, чем магний, видны повреждения через такие короткие промежутки времени, за которые вторичные эффекты, в частности, химические, не успевают серьёзно развиться. Здесь имеют место, повидимому, повреждения при каждом отдельном ударе. Значительность повреждения,

наносимого при одиночном ударе, зависит от целого ряда причин, в том числе от физических свойств материала.

В частности, здесь следует указать на опыт Фатера²⁴. Специальное приспособление, выбрасывающее с большой скоростью капли жидкости, направлялось на медный образец, и через $\frac{1}{30}$ сек. на его поверхности появлялись повреждения глубиной 0,07 мм и диаметром 0,2 мм. Никакие соображения о химических процессах или об «усталости» материала не могут быть, очевидно, привлечены для объяснения разрушающего действия в этих условиях: повреждение обнаруживалось после одного или, во всяком случае, немногих ударов капель.

Наконец, против чисто химической точки зрения говорят результаты опытов^{3,14} с химически пассивными материалами: например, опыты с разрушением агата, бетона, золота и др. Исследование микрофотографий приводит к заключению, что при кавитации прежде всего возникают на отдельных микроплощадках местные напряжения и «пики» температур («первичные процессы»), а затем уже при продолжении кавитационного воздействия появляются механические повреждения — образуются трещины. Потеря веса, естественно, на первом этапе не обнаруживается — этим объясняется наличие «инкубационного периода» на кривых потери веса. Химические процессы на этой стадии играют подсобную роль — они способствуют образованию на поверхности образца таких мест, на которых закрепляются кавитационные пузырьки, вызывающие своей деятельностью повреждения.

Только на более поздних этапах кавитационного воздействия на поверхность приобретают серьёзное значение два новых фактора — коррозия (особенно в случае химически активных материалов) и «усталость» металла.

8. КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

На основании опытов в кавитационной трубе были сделаны вначале попытки поставить потерю веса (или объёма) образца в прямую зависимость от предела прочности, который известен из обычных испытаний материалов.

Приведённая ниже таблица IV показывает, насколько несостоятельной оказалась такая точка зрения¹⁴.

Таким образом, привычные характеристики материалов оказываются совершенно недостаточными при попытке оценить, основываясь на них, стойкость материала против кавитационных повреждений (так называемое «кавитационное сопротивление материала»). Вот почему ошибочным было заключение Галлера, который вначале считал, что кавитационное сопротивление материала тем выше, чем выше твёрдость его. Что это не соответствует действительности, мы видим из опытов Муссона²⁵ и Керра²⁶.

Муссон показал, что у чугуна, например, с повышением твёрдости возрастает убыль объёма, т. е. снижается кавитационное

Таблица IV

Уменьшение обёма чугуна и легированного чугуна при кавитации

Материал	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)	Предел прочности (кг/мм ²)	Уменьшение обёма после 16 час. кавитации
Чугун	3,18	0,5	2,13	—	—	—	17,2	696*)
Лег. чугун	2,54	0,76	2,51	1,05	—	—	38,6	376
”	2,93	0,50	1,36	4,81	—	—	24,1	269
”	3,10	1,50	2,00	15,00	1,00	7,00	12,4	837
”	2,77	1,00	1,86	14,48	1,88	6,00	17,2	247
”	2,95	1,00	1,89	14,36	3,95	6,00	24,1	109

сопротивление чугуна. У углеродистой стали повышение твёрдости не вызывает заметного изменения потери веса. Зато у высоколегированной стали увеличение твёрдости всегда сопровождается понижением потерь, т. е. повышением кавитационной стойкости.

Интересно отметить, что после термической обработки сопротивление кавитационным воздействиям растёт с повышением твёрдости. Так, например, у нержавеющей стали, содержащей 0,12% C, 12,25% Cr Муссон нашёл следующее уменьшение объёма образца в зависимости от твёрдости по Бриннелю:

Таблица V

Твёрдость (H _B)	142	219	285	401
Уменьшение объёма (мм ³)	46,7	20,3	8,3	3,5

Металлы с небольшим отличием в химическом составе, но почти одинаковой твёрдости, обнаруживают значительное различие в кавитационном сопротивлении. Например, молибденовая сталь (0,27% C, 0,52% Mo) при твёрдости по Бриннелю = 192 показала на 35% большую потерю, чем Cr — Ni — Mo-сталь (0,28% C, 1,37% Ni, 0,6% Cr, 0,25% Mo) при почти той же твёрдости (H_B = 179) и пределе прочности.

*) Цифры последнего столбца дают в условных единицах уменьшение объёма образца вследствие кавитационного повреждения.

Что касается опытов с неметаллическими образцами, то особенный интерес представляет поведение стекла¹⁴. На рис. 20 приведена увеличенная в 220 раз фотография круглой стеклянной пластинки после нескольких минут кавитации в воде. Легко видеть на ней повреждения от однократных ударов в виде отдельных многочисленных мелких дырок в стекле. Только изредка они соединены тонкими трещинками. Эта фотография может служить убедительной иллюстрацией к тому, насколько малы области, где разыгрываются «первичные» процессы (пики температур и давлений). Если вспомнить к тому же, что стекло является чрезвычайно хрупким материалом, то станет ясно, насколько быстро должны протекать эти процессы, чтобы картина повреждений имела вид, показанный на фотографии.

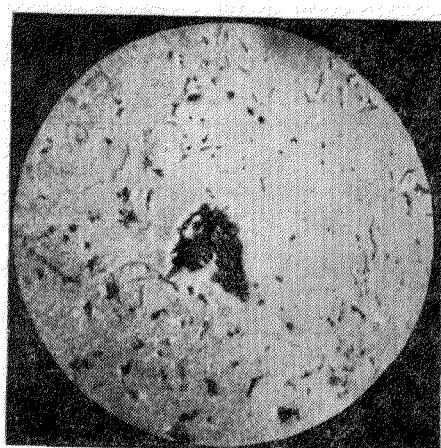


Рис. 20. Кавитационные повреждения стеклянной пластины (увеличено, примерно, в 200 раз).

максимумов температур и давления (рис. 21). К таким же заключениям приводят опыты с каучуком. После нескольких часов работы в нём появлялись такие большие внутренние напряжения, что, по свидетельству Галлера, он становился внутри жидким.

Стоит указать на то, что делались попытки найти связь между температурой плавления и кавитационной стойкостью.

Таблица VI показывает, насколько удачна такая мысль.

Таблица VI

Материал	Потеря объема (мм)	Температура плавления (°C)	Пределы прочности (кг/мм ²)	
			при 20 °C	при 500 °C
Свинец	10	327	1,35	—
Кадмий	0,7	321	6,40	—
Магний	1,4	650	17,00	0,50
Алюминий	0,5	658	14,30	0,60
Латунь с 65% Cu . . .	0,03	858	50,00	6,00
Углеродистая сталь . . .	0,01	1150—1500	54,00	27,00

Вряд ли можно надеяться установить простую зависимость только от одной из физических характеристик материала. Микрофотографии и рентгенограммы повреждённых материалов дают право утверждать, что после кратковременного кавитационного воздействия на материал мы имеем дело со структурными изменениями в кристаллических зёдрах и в кристаллических связях, с раздроблением кристаллических зёрен, с дезориентацией кристалликов, с появлением следов скольжения и растрескивания, с явными последствиями пластической деформации на малых участках поверхности образца (10^{-6} — 10^{-2} см 2)^{6, 14, 27}. Статические напряжения, которые нужны для таких деформаций, доходили бы до 9000 кг/см 2 !

Особенности кристаллической структуры, в частности, размеры кристаллических зёрен, играют важную роль при оценке кавитационного сопротивления материала. Опыты показали, например, что мелкозернистая структура оказалась более стойкой против кавитационных повреждений.

Особенно легко повреждаются сильно пористые чугуны и стали.

Для того чтобы ещё раз отметить особенность кавитационного воздействия на материал и отличие его от чисто механического повреждения, приведём краткое описание одной своеобразной методики исследования, которая применялась в связи с изучением кавитации. Мы имеем в виду работы с пескоструйными приборами²⁸. Из специальной «песочницы» направлялась струя песка на вращающийся образец—как в опытах со струёй воды. По потере веса или объёма можно было судить о характере и значительности повреждения. Никакой аналогии с поведением образцов в приборе Гейнесса или в кавитационной трубе не было найдено. В опытах со струёй песка обычные характеристики прочности материалов не теряют своей силы: чем выше твёрдость и предел прочности, тем более стойким против ударов струи песка оказывается материал.

Большое количество работ, посвящённых кавитации, позволяет теперь выделить два направления для исследования:

1. Изучение механизма кавитационного воздействия на материал—это область, которой занимаются физика и гидродинамика;

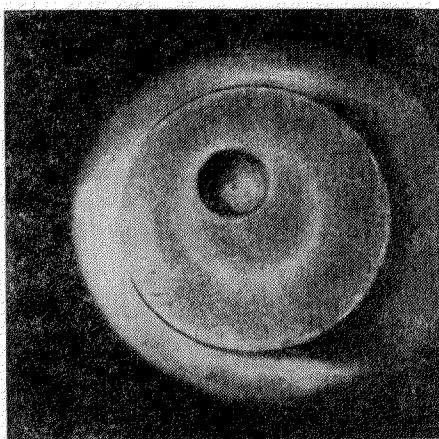


Рис. 21. Отверстие, выплавленное в монокристалле кадмия при кавитации в воде.

2. Исследование кавитационного сопротивления материалов, которое относится к металловедению.

Наш обзор был посвящён главным образом первому вопросу. Но в заключение мы сделаем дополнительно одно замечание, относящееся к результатам исследований по второму направлению.

При любых механических испытаниях материала, как известно, существуют некоторые пределы напряжений, ниже которых материал не повреждается вовсе (предел упругости, предел прочности и др.).

При кавитации же, как и в случае коррозии, мы имеем дело с непрерывным процессом изнашивания материала: если кавитация началась, любой материал рано или поздно будет повреждён. Наиболее твёрдые и вязкие материалы не являются исключениями даже при самой слабой кавитации.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Berthelot, Ann. de Chemie **30**, 232 (1850).
2. Worthington, Proc. Roy. Soc. **50**, (1891); Phil. Trans. of Roy. Soc. **A183**, 355 (1892).
3. H. Fottinger, „Hydraulische probleme“, VDI-Verlag, Berlin, 1926, стр. 14.
- 3a. H. Fottinger, „Hydromechanische Probleme des Schiffsantriebs“, Vortr., Hamburg, 1932, Berlin, 241 стр.
4. N. Gaines, Physics **3**, 209 (1932).
5. J. Hunsaker, Mech. Engng. **57**, 211 (1935); Trans. A. S. M. E., **57**, 423 (1935).
6. H. Schröter, Z. VDI **76**, 511, (1932); **77**, 865 (1934); **78**, 349 (1934); **80**, 479 (1936).
7. P. Haller, Schweiz. Bauztg. **101**, 243 (1933). Handb. der Werkstoffkunde II Bd., Berlin (1939), 471.
8. E. Honegger, B. B. C.-Mit. **14**, 74 (1927).
9. J. Ackeret и P. Haller: Schweiz. Bauztg. **108**, 105 (1936).
10. M. Vater, Z. VDI **81**, 1305 (1937); **82**, 672 (1938); **83**, 725 (1939).
11. J. Ackeret и P. Haller, Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. **4**, 293 (1938).
12. W. Schumb, H. Peters, K. Milligen, Metals and Alloys **8**, 126 (1937).
13. М. Корнфельд и Л. Суворов, J. of Physics, **6**, 75 (1942).
14. H. Nowotny, „Werkstoffzerstörung durch Kavitation“, Berlin, 1943.
15. S. Cook, Engineering **107**, 501, 515 (1919); Proc. Roy. Soc. **A119**, 481 (1928).
16. J. Rayleigh, Phil. Mag. (VI), **34**, 94 (1917).
17. J. Ackeret, Techn. Mech. Thermodyn. (Forsch. Ing. Wes.), **1**, 1—72 (1930); „Hydromech. Probleme des Schiffsantriebs“, 1932, 227.
18. Marinesco, C. R. **201**, 1187 (1935).
19. Зимаков, Изв. Акад. наук СССР **3**, 450 (1934).
20. Frenzel, Zeits. f. Phys. Chemie, **27B**, 421, 1934; Chambers, J. chem. Phys. **5**, 290, 1937.

21. Я. И. Френкель, *Acta Physico-Chimica* **12**, 317 (1940).
 22. F. Smith, *Phil. Mag.* **19**, 1147 (1935).
 23. H. Müller, „*Hydromech. Probleme des Schiffsantrieb*“, Vortrg. Hamburg, 1932, Berlin, 1932, 311 стр.
 24. M. Vater и W. Sorberger, *Z. VDI* **83**, 725 (1939).
 25. J. Mousson, *Trans. A. S. M. E.* **59**, 399 (1937), *Z. VDI*, **82**, 397 (1938).
 26. S. Kerz, *Trans. A. S. M. E.* **59**, 373 (1937).
 27. H. Böttcher, *Z. VDI* **80**, 1499 (1936).
 28. M. Vater, *Z. VDI*, **82**, 836 (1938).
 29. В. Поздюнин, *ДАН СССР* **39**, 8 (1943); *Изв. О. Т. Н. АН СССР* № 1—2 (1944), № 1—2 (1945); *Изв. О. Т. Н. АН СССР* **2**, 2 (1946).
-