

Охлаждение сопловых лопаток и корпусных деталей второй ступени и надроторного кольца первой ступени осуществляется воздухом после охладителя. Весь этот воздух подаётся по наружным трубам 39, (рис. 1, элемент А), а затем через отверстия 40 и 41 подаётся на обдув надроторного кольца 42. Небольшая часть этого воздуха через отверстия 43 поступает на уплотнение зазора между кольцом 42 и вставками 44. Остальной воздух после охлаждения надроторного кольца через отверстия 45 перепускается в полость 46, из которой он поступает на охлаждение сопловых лопаток и других деталей статора второй ступени.

Необходимо отметить, что в двигателе ГТД-45/60 применено надроторное кольцо, конструктивно отличающееся от применённого на двигателях ГТД-110 и аналогичное применяемой на двигателях типа ДН80, ДН70 и хорошо себя зарекомендовавшее в течении ряда лет. Также следует отметить, что охлаждение надроторного кольца первой ступени и корпусных деталей второй ступени воздухом после охладителя необходимо для обеспечения приемлемых величин радиальных зазоров над рабочими лопатками первой и второй ступеней при малом количестве воздуха, отбираемого на охлаждение.

Сопловые лопатки второй ступени пакетной конструкции, дефлекторные с конвективной системой охлаждения. На охлаждение профильных частей этих лопаток используется около 1,3 % воздуха от $G_{\text{вхк}}$.

Для охлаждения сопловых лопаток и деталей статора третьей ступени используется воздух из-за девятой ступени компрессора, который отбирается по наружным трубам. Сопловые лопатки третьей ступени пакетной конструкции, дефлекторные с конвективной системой охлаждения. На их охлаждение используется 0,65 % воздуха от $G_{\text{вхк}}$.

Для охлаждения деталей статора четвёртой ступени используется воздух из-за шестой ступени компрессора, отбираемый по наружным трубам.

Использование для охлаждения воздуха из промежуточных ступеней компрессора позволяет обеспечить требуемую глубину охлаждения всех деталей и узлов при минимальных расходах охлаждающего воздуха.

Необходимо также отметить, что при разработке системы охлаждения двигателя ГТД-45/60 и определении температурного состояния деталей был использован опыт доводки системы охлаждения и охлаждаемых лопаток двигателя ГТД-110.

Из изложенного следует, что разработанная система охлаждения обеспечивает уровень температур, позволяющие использовать освоенные конструктивные решения и материалы. Применение эффективных методов охлаждения позволило минимизировать отборы охлаждающего воздуха и обеспечить высокие теплотехнические показатели создаваемого двигателя.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 693.54

*Н.В. СУРДУ, А.А. ТАРЕЛИН, А.С. КОВАЛЕВ, А.В. СЛОНЕВСКАЯ,
В.В. СИБЕРНЮК*

О ПРИРОДЕ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

The model of the mechanism of occurrence of the cavitations bubble in water systems is offered. In a basis of model is the guess of the uniform nature of the plastic derisions arising in metals and fluids. The analysis of kinetics of vaporous filling of a cavitations cavity has been executed.

В настоящее время наблюдается значительный научный и практический интерес к изучению и использованию кавитационных явлений в различных технологических процессах, направленных на разработку высокоэффективного оборудования для генерации тепла, активации физико-химических превращений при переработке углей и углеводов в синтетическое топливо и т.п. Под кавитацией в жидкости обычно понимают явление образования заполненной паром и газом кавитационной каверны [1]. В различных источниках она называется полостью, пузырьем, пузырьком, сферой и т.п. Эти термины вполне применимы и адекватны физической сущности кавитации. Кавитация в жидкости может возникать: 1) в связи с локальным понижением давления, 2) из-за выделения энергии.

К первой группе относятся гидродинамическая (ГДК) [2] и акустическая кавитации (АК) [3], имеющие большое значение в природе. ГДК можно наблюдать в устройствах, уменьшающих давление жидкости согласно закону Бернулли, например в корабельных винтах, турбинах и насосах [4]. АК проявляется в полях подводных звуковых, ультразвуковых и ударно-волновых излучателей [5,6].

Ко второй группе относится кавитация, возникающая из-за локального нагрева жидкости при помощи лазерного или СВЧ излучения, а также в результате диэлектрического пробоя (подводный разряд). Кавитацию можно наблюдать также в следе быстрых элементарных частиц (например, протонов) - эффект, используемый в пузырьковых камерах [7].

Общую картину образования кавитационного пузырька принято представлять в следующем виде [1-4]. В фазе разрежения в жидкости образуется разрыв в виде полости, которая заполняется насыщенным паром данной жидкости. Через стены полости в нее диффундирует растворенный в жидкости газ. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз, а газ подвергается сильному адиабатическому сжатию, в результате чего давление и температура газа могут достигать значительных величин. По различным данным температура может доходить от нескольких тысяч [4] до нескольких миллионов [8] градусов К. После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная

волна, быстро затухающая в пространстве. Кроме того, кавитация сопровождается возникновением сонолюминисценции и звукохимическими реакциями.

В настоящее время существуют две основные группы моделей, выдвинутых для объяснения энергоемких химических и физико-химических эффектов, вызываемых кавитацией: тепловые и электрические. Электрические модели связывают упомянутые процессы с разрядом внутри кавитационного пузырька вследствие накопления на его стенках электрических зарядов.

Тепловые теории объясняют появление сонолюминисценции и звуковых химических реакций возникновением высоких температур внутри кавитационного пузырька при его адиабатическом сжатии. Основополагающее исследование в этой области – полученное Рэлеем [9], и развитое Нолтингом – Непайрасом [10] стало классическим решением задачи о росте и замыкании заполненной паром сферической полости в неограниченном объеме невязкой, несжимаемой и лишенной капиллярных свойств жидкости под действием постоянного перепада давлений.

На данный момент общепринятой моделью является тепловая (адиабатическая), так как неизвестны, какие либо экспериментальные постановки, напрямую подтверждающие модель электрического пробоя.

Выше было отмечено, что предтечей возникновения кавитационного пузырька является локальная деформация и разрыв межмолекулярных связей в структуре жидкости, что, по аналогии с твердым телом или металлами, можно идентифицировать как возникновение локальной микротрещины. Как известно, зарождению микротрещин в кристаллах (в том числе обладающих хрупкостью) всегда предшествует локальная пластическая деформация, которая развивается по дислокационному механизму. Может ли такое явление наблюдаться и в воде? Если да то, какими свойствами должна обладать вода? И при каких условиях будет проявляться это явление?

Для получения ответов на поставленные вопросы необходимо, прежде всего, установить обладает ли вода кристаллической или кристаллоподобной структурой. Для получения ответа на этот вопрос проведем следующий анализ.

Известно, что при охлаждении до 0°C и ниже вода замерзает переходя в кристаллическое состояние. При нагреве от 0°C до 100°C, вода сначала плавится, превращаясь в жидкость, а затем испаряется превращаясь в пар. Удельная теплота плавления льда равна 0,34 МДж/кг. Количество теплоты, которое нужно, чтобы нагреть 1 кг воды на 100°C, равно 0,42 МДж/кг, причем из этого количества, только около одной четверти приходится на недостающую часть теплоемкости (примерно 0,107 МДж/кг). Удельная теплота испарения воды при атмосферном давлении равна 2,3 МДж/кг, причем из этой величины примерно 0,17 МДж/кг приходится на работу, которую расширяющийся водяной пар совершает против сил атмосферного давления (на разрыв связей остается 2,13 МДж/кг). Таким образом, получается, что на разрыв всех связей тратится приблизительно 2,56 МДж/кг. Итак, по мере нагрева сначала 13% связей рвутся при таянии льда, затем 4%

связей рвутся в процессе нагрева воды от 0°C до 100°C, а оставшиеся 83% связей рвутся при испарении воды.

Если учесть, что на одну водородную связь приходится примерно 2·10⁴ Дж/моль энергии, то при испарении воды тратится столько энергии, что на каждую испарившуюся молекулу приходится примерно по 2 разорванные водородные связи. Это означает, что молекулы в жидкой воде в среднем занимают положения и ориентации, соответствующие тетраэдрической пространственной структуре типа алмаза. (Экспериментальные данные, полученные с помощью рентгеноструктурного анализа, нейтронографии и других физических методов, позволяют утверждать, что трехмерная приближенно тетраэдрическая сетка водородных связей существует и у льда, и у жидкой воды.)

Таким образом, вывод, который можно сделать на основе проведенных оценок, таков: структура воды в диапазоне температур от 0°C до 100°C более чем на 80% повторяет структуру льда. Если это так, то тогда вполне обосновано предположить, что структура воды представляет собой термодинамически уравновешенную систему, состоящую из микрокристалликов льда (кластеров), погруженных или окруженных свободными от кристаллических связей молекулами воды. При этом между кластерами и свободными молекулами происходит постоянный тепло- массообмен, т.е. некоторые свободные молекулы связываются в кластеры, а некоторые связанные с кластерами молекулы воды становятся свободными от связей. Причем все это находится в термодинамическом равновесии, которое нарушается при изменении температуры воды.

В подтверждение этих выводов, могут служить результаты, полученные в исследованиях С.В. Зенина, в которых он обосновал наличие крупных и стабильных, геометрически симметричных образований из пятидесяти семи молекул воды, представляющих собой додекаэдрические тетраэдры, построенные в соответствии с принципом равновероятного подхода к центрам связывания молекул воды. Эти “кванты” из 57-и молекул стали основой для последующего построения 16-ти квантовой макромолекулы (912 молекул воды), так что воду в принципе можно было представить в виде плотной упаковки этих квантов.

Но если вода представляет собой систему, состоящую из кристаллообразных кластеров и свободных молекул, то, что с ней происходит, когда она движется, например, по трубопроводам, или другим системам встречая на своем пути различные препятствия. Заметим, что движение или течение жидкости можно (и следует) рассматривать как реакцию-релаксацию сложной системы молекул и кластеров на внешнее возмущающее воздействие, которое приводит к изменению расположения составных частей системы друг относительно друга. В большинстве случаев течение воды можно представить как “бездеформационное” перемещение друг относительно друга кластеров, между которыми располагаются “свободные” от связей молекулы воды. Однако при определенных условиях может возникнуть такая ситуация, когда льдоподобные структуры (или

кластеры) не смогут перемещаться друг относительно друга без деформации, развиваемой по их "телу". Что тогда? Скорее всего, такая ситуация должна привести к пластическому деформированию льдоподобных структур. Причем пластическая деформация будет развиваться с "поверхности" указанных структур и по дислокационному механизму. Можно предположить, что явления, происходящие в ядре дислокации, описанные в [11,12] приведут к возникновению избыточного заряда. Тогда между атомами, образующими ядро дислокации, зарождающейся на поверхности льдоподобной структуры, возникнут силы взаимодействия, баланс которых определит размеры "внутренней полости" ядра. Равновесное значение радиуса полости ядра дислокации можно представить [11] в следующем виде:

$$r_0 = \frac{\mu \cdot b^2}{8\pi^2 \gamma \cdot (1-\nu)} + \frac{Q_\Sigma^2}{2\pi^2 \gamma \cdot \epsilon_0 \cdot a^2}, \quad (1)$$

Если предположить, что ядро дислокации, равной периоду кристаллической решетки, имеет суммарный заряд Q_Σ , который кратен элементарному заряду e , т.е., $Q_\Sigma = e \cdot n$ (где n – натуральное число, а элементарный заряд $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Выберем из справочных таблиц [13-15] значение модуля сдвига μ , периода кристаллической решетки a , который для воды равен расстоянию между атомом кислорода и водорода, удельной поверхностной энергии γ ; коэффициент Пуассона ν и произведем оценку величины r_0 для воды. Будем считать, что вектор Бюргерса b равен периоду кристаллической решетки a , а $n=1$. Значение электрической постоянной равно $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Результат расчета показывает, что величина равновесного радиуса полости ядра дислокации, рассчитанная по формуле (1), составляет $0,22 \cdot 10^{-6}$ м.

В теории жидкостей постулируется существование мельчайших пустот, или «дыр». Жидкое состояние рассматривается как псевдокристаллическое с большим числом дислокаций. Еще Фишер [16], Френкель [17], Ферс [18] предложили теории расчета таких «дыр», возникающих в условиях статистического равновесия в результате случайных тепловых флуктуаций. Все эти теории дают одинаковое значение диаметров «дыр» в условиях статистического равновесия порядка 10^{-6} м.

Отметим, что рассчитанная нами величина радиуса ядра дислокации хорошо согласуется с экспериментальными данными разных авторов [19].

Таким образом, причиной возникновения кавитационной каверны вполне могут служить явления и силы, возникающие между атомами ядра зарождающейся дислокации. Естественно предположить, что в момент образования такой "кавитационно-дислокационной" полости внутри нее, скорее всего, должен быть вакуум, который в дальнейшем должен уменьшаться за счет заполнения полости испарившимися с поверхности каверны молекулами пара. Проведем оценку кинетики изменения давления в "кавитационно-дислокационной" каверне.

Проведем оценку числа единичных молекул испаряющихся в расчете на единицу площади в единицу времени.

Обозначив работу, которую нужно затратить для того, чтобы вырвать поверхностную молекулу из положения равновесия и удалить ее в бесконечность, т.е. энергию испарения, через U_0 , можем определить соответствующее минимальное значение скорости V_x молекулы воды массой m в момент прохождения ее через равновесное положение

$$\frac{1}{2} m V_{x \min}^2 = U_0 \quad (2)$$

Согласно закону Максвелла, относительное число атомов, скорость которых по оси X заключена в интервале между V_x и $V_x + dV_x$,

$$f(V_x) dV_x = \sqrt{\frac{m}{2\pi \cdot kT}} \cdot e^{-\frac{mV_x^2}{2kT}} \cdot dV_x \quad (3)$$

Число атомов, проходящих за время dt через положение равновесия с направленной наружу скоростью, заключенной между V_x и $V_x + dV_x$, равно $n f(V_x) dV_x \cdot V_x \cdot dt$, где n – среднее число частиц в единице объема жидкости [10]. Все те из них, для которых $V_x \geq V_{x \min}$, не возвращаются более в положение равновесия, а улетают наружу. Следовательно, скорость испарения может быть определена из соотношения

$$G = n \int_{V_{x \min}}^{\infty} V_x f(V_x) \cdot dV_x, \quad (4)$$

Произведем замену переменных $U = mV_x^2/2$, $V_x dV_x = m^{-1} dU$.

Далее имеем:

$$G = n \sqrt{\frac{m}{2\pi \cdot kT}} \cdot \frac{1}{m} \int_{U_0}^{\infty} e^{-\frac{U}{kT}} \cdot dU = n \cdot \sqrt{\frac{kT}{2\pi \cdot m}} \cdot e^{-\frac{U_0}{kT}}. \quad (5)$$

Последующие преобразования дают следующее решение:

$$G = n \sqrt{\frac{kT}{2\pi \cdot m}} \cdot e^{-\frac{U_0}{kT}} = \frac{P_s}{\sqrt{2\pi \cdot m}} \cdot e^{-\frac{U_0}{kT}}, \quad (6)$$

где P_s – давление насыщения при данной температуре, [Па].

Поток энергии в кавитационную каверну можно рассчитать по соотношению:

$$E = G \cdot r_{ph \cdot mol}, \quad (7)$$

где $r_{ph \cdot mol}$ – молекулярная теплота фазового перехода при испарении.

Выразим энергию испарения через теплоту фазового перехода, умножив подынтегральное выражение на $mV_x^2/2$.

$$E = n \int_{V_{x \min}}^{\infty} \frac{mV_x^2}{2} \cdot V_x \cdot f(x) \cdot dV_x \quad (8)$$

После соответствующих преобразований и интегрирования получим:

$$E = n \int_{V_{x\min}}^{\infty} \frac{mV_x^2}{2} \cdot \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \cdot e^{-\frac{mV_x^2}{2kT}} \cdot dV_x = n \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \cdot \frac{1}{m} \int_{U_0}^{\infty} U \cdot e^{-\frac{U}{kT}} dU =$$

$$= n \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \cdot \frac{1}{m} \cdot \left[(-U - kT) \cdot kT \cdot e^{-\frac{U}{kT}} \right]_{U_0}^{\infty} = n \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} (U_0 + kT) \cdot e^{-\frac{U_0}{kT}} \quad (9)$$

С учетом (5)-(9) соотношение (7) можем преобразовать к виду

$$r_{ph\text{-}mol} = \frac{E}{G} = U_0 + kT \quad (10)$$

и учитывая, что $U_0 = \frac{mV_{x\min}^2}{2}$, получим соотношение между U_0 и $r_{ph\text{-}mol}$:

$$U_0 = r_{ph\text{-}mol} - kT \quad (11)$$

Окончательное выражение для потока молекул испаряющихся в расчете на единицу площади в единицу времени имеет вид:

$$G = \frac{P_s}{\sqrt{2\pi m k T_{ж}}} \cdot e^{-\frac{r_{ph\text{-}mol} - kT}{k \cdot T_{ж}}} \quad (12)$$

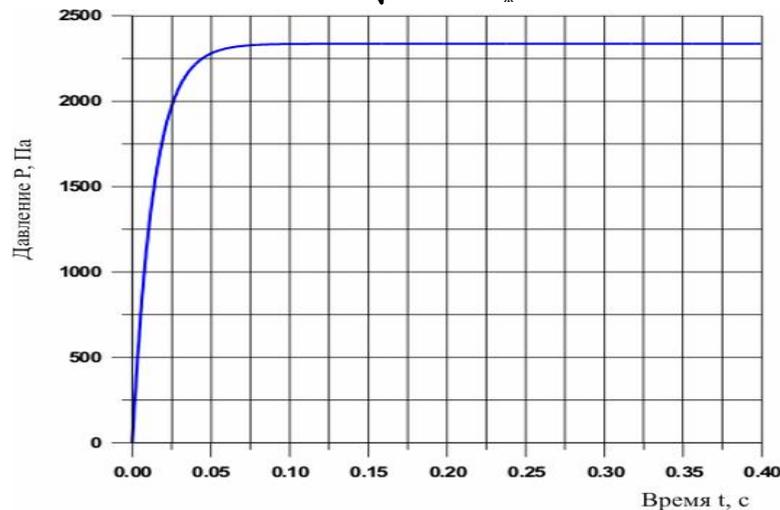


Рис. Кинетика изменения давления в кавитационном пузырьке.

При расчете использовались значения параметров, взятые из [20]: $P_s=2336,80$ Па, $T_{ж}=293$ К, $r_{ph\text{-}mol}=2453800,01$ [Дж/кг]; начальное давление газа в пузырьке принималось равным нулю. Масса молекулы воды $m = 2,988 \cdot 10^{-26}$ [кг],

Давление пара в кавитационном пузырьке можно определить из уравнения:

$$P_v = D \cdot r_0 \cdot T_v \quad (13)$$

где T_v - температура пара, К ($T_v = T_{ж}$); D - плотность пара в пузырьке.

Результаты расчетов кинетики заполнения кавитационной полости с учетом потока конденсирующихся молекул на единицу площади пузырька в единицу времени представлены на рисунке.

Анализ полученных результатов показывает, что для заполнения кавитационной каверны парами из окружающей ее жидкости до давления насыщения необходимо время $\geq 0,05$ секунды. Следовательно, при разработке технологических процессов, основанных на использовании химических реакций, возникающих при схлопывании кавитационных полостей, необходимо учитывать кинетику заполнения каверны паром.

Выводы.

1. Одной из причин образования кавитационной каверны может быть возникновение пластического сдвига в кристаллоподобной структуре воды по дислокационному механизму. Для расчета размера такой каверны можно использовать уравнение (1).
2. Для заполнения кавитационной каверны паром (или газом) до давления насыщения необходимо время не менее 10^2 с. Поэтому при разработке процессов основанных на кавитационных явлениях (например, при переработке бурых углей в синтез-газ или искусственную нефть и пр.) этот факт необходимо учитывать.

Список литературы: ¹. V. Lauterborn. Cavitation // Encyclopedia of Acoustics, Ed.: M.J. Crocker. John Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 263-270. ². Арзуманов З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. - М.: Энергия, 1978. - 303 с. ³. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. - М.: Мир, 1967. - Т. 1, Ч. Б. - С. 7 - 138. ⁴. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. - М.: Мир, 1974. - 668 с. ⁵. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: ИЛ, 1957. ⁶. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. ⁷. Пузырьковые камеры / Под ред. Н.Б. Делоне. М.: Госатомиздат, 1963. ⁸. Taleyarkhan, R. P. et al. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitations, Science 295, 1868-1873 (2002). ⁹. Rayleigh. Phyl. Mag., 1917, v. 34, s. 6, p. 94. ¹⁰. Noltink B. E., Neppiars E.A. - Proc. Phys. Soc., 1950, 63 b, 674. ¹¹. Сурду Н.В. Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 1. О наличии полости вдоль оси дислокации // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. - Харьков: НАКУ "ХАИ", 2000. - Вып. 23 (6). - С.116-123. ¹². Сурду Н. В. Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 2. Модель микромеханизма // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. - Харьков: НАКУ "ХАИ", 2001. - Вып. 24 (1). - С.139-147. ¹³. Самойлович Г. С. Гидрогазодинамика. - М.: Машиностроение, 1990. - 384 с. ¹⁴. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. И., ИЛ, 1949. ¹⁵. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник. - М.: Атомиздат, 1976 - 36 с. ¹⁶. Fisher J. C. The Fracture of Liquids. Jr. Appl. Phys., v.19, 1948. - p.1062. ¹⁷. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1945, 10 с. ¹⁸. Furth R. On the theory of Holes in Liquids. Proc. Phys. Soc. (London), 52, 768, 1940. ¹⁹. Taleyarkhan R. P. et al. - Phys. Rev., 2004, v. 69, 036109. ²⁰. Теплофизические свойства веществ. Справочник. - М.: Государственное энергетическое издательство, 1956. - 83 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008