

УДК 53:532; 53:533; 53.06; 67:532.528

**В. Ю. СКОСАРЬ***Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»*

## ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КАВИТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

*Проведен качественный анализ механизмов преобразования и выделения энергии при кавитации. Показано, что механическая энергия кавитирующей жидкости может преобразовываться в электрическую, световую и тепловую энергии. Сделано предположение, что при многопузырьковой кавитации возможно выделение тепла жидкостью, превышающее затраты энергии на возбуждение кавитации. Избыток выделения тепла может быть связан с обратимыми структурными переходами в жидкости. Для воды это может быть обусловлено преобразованиями ее кластерной структуры, структуры газовых включений в виде нанопузырьков – бабстонов. Результаты анализа могут быть использованы для разработки рациональных способов энерговыделения в кавитационных устройствах.*

**Ключевые слова:** преобразование и выделение энергии, многопузырьковая кавитация, кавитационные устройства, структура воды.

### Введение

Кавитация – одно из самых сложных, многогранных и, без преувеличения говоря, загадочных явлений. Кавитация сопровождается преобразованием механической энергии, подводимой к жидкости, в энергию электрическую (искрообразование, ионизация), световую (люминесценция), тепловую (разогрев) и химическую (иницирование и ускорение химреакций) [1]. Для авиационной и космической технологий изучение механизмов энерговыделения при кавитации может представлять интерес вот в связи с чем. Использование кавитационных процессов дает возможность улучшить характеристики жидкого органического топлива, обеспечить высокую чистоту специальных литейных сплавов или разрабатывать эффективные устройства для системы регулирования ракетного двигателя [2]. Но многие эмпирические факты, связанные с кавитацией, пока еще не получили удовлетворительного объяснения, и потому полезные свойства кавитации еще не нашли такого широкого применения в самолетостроении и ракетной технике, которого они заслуживают.

### 1. Формулирование проблемы

В настоящей работе автор рассмотрит наиболее интересные с физической точки зрения явления, обнаруженные при кавитации, и обсудит возможные механизмы преобразования и выделения энергии в процессе кавитации. Целью работы является качественный анализ механизмов преобразования и выделения энергии при кавитации для использования

его результатов в разработке рациональных способов энерговыделения в кавитационных устройствах.

### 2. Аналитическая часть

Большинство феноменов, связанных с кавитацией, обнаружено в воде. Самая известная и распространенная в природе жидкость оказывается самой богатой и загадочной по своим свойствам. Но, физика кавитации не исчерпывается только процессами в воде. За исходную точку анализа механизмов преобразования энергии в процессе кавитации автор выбрал обзорную статью М. А. Маргулиса, посвященную сонолюминесценции [3]. Сонолюминесценцией (СЛ) или звуколюминесценцией называют слабое свечение в жидкости, возникающее под воздействием акустических колебаний при возбуждении в жидкости кавитации. Впервые это явление было обнаружено в 1934 г., и с тех пор не прекращает удивлять исследователей новыми эффектами [1, 3]. Чаще всего для возбуждения кавитации используют воздействие на жидкость ультразвуком, что приводит к «обычной» многопузырьковой СЛ, вызванной образованием и схлопыванием множества кавитационных пузырьков в объеме обрабатываемой жидкости. Но в 1992 г. была открыта однопузырьковая СЛ, происходящая в специальном устройстве. Речь идет о фокусирующей акустической камере, позволяющей создавать и фиксировать один стабильный кавитационный пузырек без какого-либо его расщепления. С тех пор обнаружено множество свойств, которые показывают как сходства однопузырьковой СЛ с «обычной» многопузырьковой, так и отличия этих явлений. Главное сходство

их состоит в том, что СЛ осуществляется из пульсирующего кавитационного пузырька [3]. Изучение СЛ позволило обнаружить и обобщить ряд интересных закономерностей процесса кавитации и предложить оригинальные физические модели, позволяющие приоткрыть механизмы преобразования энергии в кавитирующей жидкости. По замечанию Маргулиса, гипотезы, объясняющие обширный экспериментальный материал по СЛ, группируются в две теории: тепловую теорию СЛ; электрическую теорию СЛ. В первой из них причиной свечения считается адиабатический нагрев паров жидкости и газов до температур  $\sim 10^4$  К внутри схлопывающихся пузырьков, что ведет к термической диссоциации молекул воды и последующей рекомбинации радикалов Н и ОН. При таких температурах возникает свечение газов и свечение за счет рекомбинации радикалов. Кроме того, нагрев возможен за счет фокусировки ударных волн внутри пузырьков. Однако если учесть неидеальность газо-паровой смеси внутри пузырьков, медленность процессов испарения и конденсации внутри пузырьков относительно процесса схлопывания, а также наличие множества деформаций формы пузырьков и даже их расщепление на мелкие фрагменты, то численные расчеты тепловой теории СЛ (значения максимальных температуры и давления, парциального давления газа, паров жидкости и продуктов диссоциации) становятся весьма ненадежными. И применимость тепловой теории для «обычной» многопузырьковой СЛ вызывает большие сомнения [3]. А вот сферическая симметричность крупного кавитационного пузырька в специальных фокусирующих акустических камерах и стабильность этого пузырька позволяют достаточно убедительно приложить тепловую теорию к случаю однопузырьковой СЛ. При однопузырьковой СЛ развивается давление 100-1000 атм., и температура достигает  $(2-3) \times 10^5$  К. Это явление перспективно в плане создания таких акустических камер, которые обеспечат внутри схлопывающегося пузырька температуру и давление, достаточные для ядерного синтеза [3]. При «обычной» многопузырьковой СЛ, согласно Маргулису, наиболее вероятным механизмом свечения является электрический пробой. Этот вариант электрической теории СЛ мы рассмотрим подробнее. Еще Френкелем, известным советским физиком была предложена одна из электрических гипотез, согласно которой нескомпенсированный заряд на стенках пузырьков формируется в момент их образования. Начальная форма пузырьков предполагалась линзообразная, а величина заряда определялась флуктуациями ионов в жидкости. К сожалению, учет величины электропроводности жидкости, концентрации ионов, диффузии электронов, процессов рекомбинации и др. делает гипотезу

Френкеля и остальные электрические гипотезы неубедительными. А при сферической симметрии пузырьков вообще исчезают основания для объяснения несимметричности распределения зарядов и возникновения электрического поля в пузырьках [3]. Поэтому Маргулисом предложен свой вариант электрической теории СЛ. Основные положения этой теории следующие: в жидкости у поверхности раздела с кавитационным пузырьком возникает двойной электрический слой за счет ориентационного эффекта или наличия ионов примеси; при пульсировании пузырьки теряют сферическую форму вплоть до расщепления на части, создавая мощные течения жидкости вблизи себя; нескомпенсированный электрический заряд образуется в результате этих течений, которые смывают часть диффузионного двойного электрического слоя; нескомпенсированный электрический заряд в условиях схлопывания или расщепления пузырьков порождает электрический пробой; электрический разряд пробоя сопровождается возбуждением и расщеплением молекул газов и жидкости внутри пузырька и к СЛ, а также к звукохимическим реакциям. Поясним. Достаточно ничтожно малого количества примеси (концентрации порядка  $7 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>) в воде, чтобы возник двойной электрический слой на поверхности пузырьков. Двойной электрический слой имеет внешнюю часть, так называемый диффузионный слой, молекулы которого не фиксированы жестко у границы кавитационного пузырька, а могут перемещаться в жидкости. Потеря пузырьками сферичности, вплоть до расщепления на части, может осуществляться несколькими способами, которые можно условно классифицировать следующим образом, опираясь на работу Маргулиса: образование кольцевых кумулятивных струй; образование нескольких осколочных пузырьков; образование радиальных кумулятивных струй; (слева направо, см. рис. 1). В местах 1 (за счет кольцевого сжатия), 2, 3 и 4 (за счет осколочного отщепления), а также 5 (за счет отрыва кумулятивной струи) возникают новые кавитационные пузырьки. Характерное время электрического пробоя ( $\sim 10^{-11}$  с) на много порядков меньше времени релаксации заряда из-за электропроводности ( $\sim 10^{-7}$  с) и еще меньше периода акустических колебаний [3]. По оценкам Маргулиса, для типичных кавитационных пузырьков, в случае «обычной» многопузырьковой кавитации, при частоте ультразвука 20 кГц, внешнем давлении 1 атм., температуре жидкости 293 К и абсолютной влажности воздуха 11 г/м<sup>3</sup>, внутри пузырьков сформируется напряженность электрического поля порядка  $1,5 \cdot 10^9$  В/м, которая значительно превысит критическую напряженность (пробоя)  $3 \cdot 10^6$  В/м.

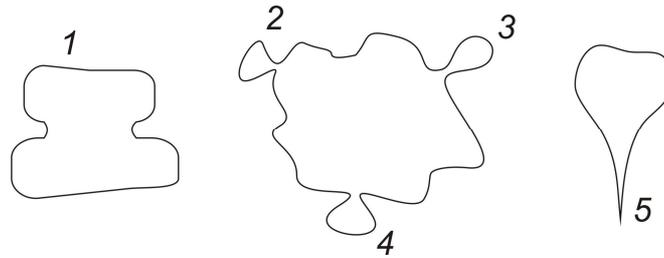


Рис. 1. Нарушение сферической симметрии и расщепление кавитационных пузырьков [3]

Кроме того, длина свободного пробега электрона будет много меньше типичного радиуса кавитационного пузырька, т.е. обеспечиваются основные условия для возникновения лавинной ионизации внутри пузырьков. Более того, оказывается, что лавинная ионизация с пробоем возможны даже на стадии расширения кавитационных пузырьков, насыщенных воздухом [3]. Согласно [1], при электрических разрядах в газах температура плазмы достигает  $\sim 10^4$  К (максимум – до  $\sim 10^5$  К), а средняя энергия электрона при этом достигает  $\sim 1$  эВ (максимум  $\sim 10$  эВ). Такая температура и энергия электронов соответствуют спектрам многопузырьковой СЛ воды, которые дают максимумы свечения, в зависимости от природы полос эмиссии, на длинах волн в пределах 270-600 нм [3], т.е. оптический диапазон и ближний ультрафиолет. Посмотрим теперь, какие процессы возможны в связи с электрическими разрядами в кавитационных пузырьках. Поток электронов внутри пузырька должен облучать поверхность пузырька и ближайший объем жидкости, а также детали кавитационного устройства. Электроны разряда будут соударяться с электронными оболочками атомов жидкости и атомов материалов кавитационного устройства, теряя энергию за счет возбуждения атомов и их ионизации, а также (при достаточно большой энергии) соударяться с ядрами атомов, теряя энергию за счет тормозного излучения. Известно [1], что интенсивность потерь на тормозное излучение становится одинаковой с интенсивностью потерь на ионизацию и возбуждение атомов, начиная только с некоторой критической энергии Екр электронов. В этом случае тормозное рентгеновское и тормозное  $\gamma$ -излучения становятся заметными на фоне прочих процессов энерговыделения. Поскольку интенсивность тормозного излучения пропорциональна квадрату массы ядер, на которых идет рассеяние, то на металлических частях кавитационного устройства рассеяние более вероятно заметить, чем в объеме кавитирующей воды или газа внутри пузырьков. Известно, например, что Екр для свинца порядка 10 МэВ, а Екр для воздуха 200 МэВ. Известно также, что спектр фотонов тормозного излучения обрывается при максимально возможной

энергии, равной энергии электронов [1]. Отсюда следует, что энергии электронов пробоя (1-10 эВ) явно не хватает для возбуждения тормозного излучения (10-200 МэВ). А значит, не следует ожидать повышения уровня радиации вблизи кавитационных устройств. Поэтому, по мнению автора, в известных кавитационных устройствах не должно наблюдаться  $\gamma$ -излучение, вызванное многопузырьковой кавитацией. А все сообщения о наблюдении радиации необходимо тщательно перепроверять на предмет достоверности. А теперь посмотрим, какие факты преобразования и выделения энергии в кавитационных устройствах опубликованы в литературе. Автор предлагает пока не рассматривать общеизвестный механизм диссипации механической энергии за счет вязкого трения с выделением эквивалентного тепла.

В работе [4] утверждается, что в кавитационных устройствах из жидкости извлекается скрытая внутренняя энергия вещества. При этом возможны два механизма энерговыделения: за счет обратимых фазовых переходов в жидкости и за счет низкотемпературного ядерного синтеза. (Разумеется, в случае обратимого фазового перехода жидкость затем релаксирует и восполняет потерю внутренней энергии за счет окружающей среды, так что закон сохранения энергии не нарушается). В частности, для воды должен быть фазовый переход из обычного состояния в состояние «упорядоченное, близкое к жидкокристаллическому», что приводит к выделению тепла. А процесс воздействия на воду в кавитационных устройствах авторы работы [4] характеризуют, как механоактивацию воды. Что же касается признаков низкотемпературного ядерного синтеза, то авторы статьи [4] констатируют, что в их работе они не обнаружены. Так, в серии из 27-ми экспериментов не было обнаружено повышения уровня ионизирующего излучения свыше естественного фона. При этом речь шла о кавитирующей воде в устройстве (гидродинамическом нагревателе), использующем принцип завихрения жидкости и возбуждения в ней кавитации. В работах А. А. Халатова с соавторами утверждается, что обнаружен факт превышения уровня  $\gamma$ -излучения в 1,25-1,875 раз более фонового уровня вблизи деталей аналогичного кавитационно-

го устройства (вихревого теплогенератора) [5, 6]. Высказано предположение, что  $\gamma$ -излучение может быть связано с взаимодействием кавитационных пузырьков с металлическими частями устройства [5]. Однако, по мнению автора, этот результат требует многократных и тщательных проверок. Аргументированная критика сообщений о фиксации избытка  $\gamma$ -излучения вблизи кавитационных устройств содержится в [7]. Суть ее в том, что при таких наблюдениях чаще всего нарушена методика эксперимента. Важным достижением работ [5, 6] являются результаты теплофизических экспериментов с кавитирующей водой и их анализ, а также анализ литературных источников по кавитационным теплогенераторам. В статье [5] установлено следующее:

- по информации производителей кавитационных устройств для подогрева воды, их рекламируемая способность преобразовывать механическую энергию воды в тепловую («коэффициент преобразования энергии») составляет 1,2-1,9 и даже выше. Т.е. удается извлечь порядка 20-90% (и более) тепловой энергии свыше затрат энергии на активацию воды с помощью электродвигателя или бензинового (дизельного) двигателя. Но, по замечаниям потребителей этих устройств, никаких дополнительных извлечений тепловой энергии не наблюдается;

- тщательное проведение теплофизических экспериментов показывает, что в кавитационном устройстве для подогрева воды практически соблюдается баланс потребляемой энергии и производимой теплоты, за исключением небольших отклонений;

- небольшое отклонение от баланса потребляемой энергии и производимой теплоты можно объяснить теплообменом между неизолрованными элементами теплообменника и внешней средой. В отдельных случаях наблюдается факт превышения выделения тепла в зоне кавитации, что, вероятно, связано с поглощением некоторыми частями устройства небольшого количества теплоты из окружающей среды;

- локальный «перегрев» воды в кавитационных устройствах имеет неравновесный характер, поскольку уже на выходе из зоны кавитации вода релаксирует и поглощает «избыток» теплоты, что фактически приводит к балансу потребляемой энергии и производимой теплоты. Этот факт может быть объяснен кратковременным изменением теплоемкости за счет двухфазного состояния кавитирующей воды, которая содержит газовую фазу и обладает меньшей теплоемкостью, чем обычная вода [5].

Поскольку в литературе делаются попытки объяснить дополнительное тепловыделение в кавитационных устройствах за счет механоактивации воды, изменения ее фазового состояния и структу-

ры, то необходимо рассмотреть эти возможности. Явление механоактивации твердых тел известно давно и рассматривается, как процесс при ударном, ударно-стирающем или истирающем воздействиях, приводящих к накоплению в частицах твердых тел структурных дефектов и/или к фазовым превращениям, в том числе, к аморфизации кристаллов, которые влияют на химическую активность веществ [8]. Позднее стали появляться работы по механоактивации жидкостей, например, жидкого органического топлива и др. нефтепродуктов [9]. А также работы по механоактивации воды, в которых наблюдается диссоциация молекул воды и образование  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$  и радикалов воды, в зависимости от условий активации [10, 11]. Механоактивация считается процессом перехода в метастабильное химически активное состояние. Но, если процессы механоактивации твердых тел изучаются давно и более или менее понятны, то с механоактивацией жидкостей еще предстоит выяснить множество вопросов. По мнению автора, для понимания сути происходящих при механоактивации воды процессов, полезно проследить за некоторыми аналогичными процессами в твердых телах. Известно, что при механоактивации полимеров в них происходит разрыв ковалентных связей основных цепей с образованием свободных радикалов и образование макромолекул, характеризующихся разветвлениями и сшивками [12]. Для нас здесь может быть полезным наблюдение за поведением полимерных макромолекул, поскольку предполагается, что и вода способна образовывать соединения по типу полимеров: кольцевые структуры из 6-ти и более молекул, квазиодномерные цепи молекул и т.п. [13, 14]. Более того, существует обоснованная гипотеза, что воду можно рассматривать, как «динамически нестабильную полимерную систему» [11]. Однако в случае полимеров речь идет о разрыве и возникновении устойчивых ковалентных связей, тогда как в воде определяющими являются слабые водородные связи, время жизни которых очень мало ( $10^{-12}$  с) [13]. Казалось бы, неустойчивость водородных связей сводит на нуль всякую аналогию с полимерами, однако в 1999-2002 гг. было обнаружено, что водородная связь на 10 % является ковалентной по характеру, а значит, она может обеспечить возможности для создания устойчивых структурных образований в жидкой воде, подобно полимерам [13, 14]. Как подтверждение этому, появились интересные результаты спектроскопических исследований КР (рамановские спектры) в воде [15]. Авторы указанной работы обнаружили, что в жидкой воде вплоть до точки кипения (до 99°C) устойчиво существуют льдоподобные молекулярные комплексы, хотя, чем выше температура, тем слабее они проявляются на фоне «обычной» жидкой воды.

Льдоподобные комплексы являются гексамерными кластерами молекул воды, подобными гексагональной структуре льда, тогда как «обычная» вода представлена тетрамерными кластерами молекул воды [15]. Кроме полимеров могут быть интересны процессы механоактивации диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Жидкий  $\text{SiO}_2$  считается структурным аналогом воды. В ряде работ расплав  $\text{SiO}_2$ , жидкую воду  $\text{H}_2\text{O}$  и некоторые другие вещества объединяют понятием «сетчатые» жидкости, от которых ожидают переходов при высоких давлениях, сопровождающихся резкими изменениями структуры ближнего порядка, термодинамических и кинетических свойств. Сказанное относится и к аморфным телам и к стеклам [16]. Например, в стеклах  $\text{SiO}_2$  при высоких давлениях (~3 ГПа при ~1000 К, и ~8 ГПа при 300 К) обнаружены структурные фазовые переходы; найдены факты в пользу аналогичных фазовых переходов в жидком  $\text{SiO}_2$  [17]. Имеются сообщения о том, что в воде обнаружены признаки фазового перехода жидкость-жидкость при высоких давлениях порядка ГПа, и предложена условная фазовая диаграмма, общий вид которой помещен ниже [18].

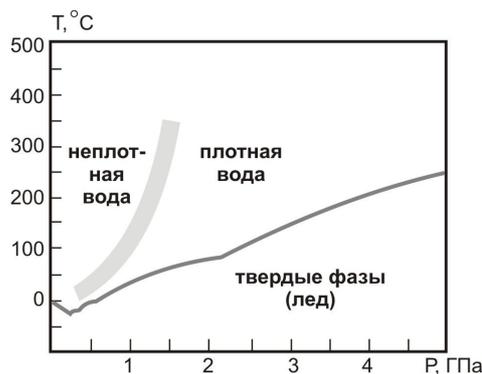


Рис. 2. Фазовая диаграмма воды (схематически) [18]

Известно, что при схлопывании кавитационных пузырьков могут развиваться весьма высокие давления, которые теоретически способны изменить структуру воды и повлиять на многие ее свойства. Однако, если верна диаграмма на рис. 2, давлений порядка 1000 атм. (0,1 ГПа), которые наблюдаются при схлопывании пузырьков в кавитирующей воде, будет недостаточно для фазового перехода. Учитывая значения температуры в пузырьках, давление должно достигать 1,5-2 ГПа и выше, чтобы произошел фазовый переход. Таким образом, фазовый переход жидкость-жидкость не должен проявляться в известных кавитационных устройствах. Но вернемся к структуре жидкой воды. В настоящее время популярна модель кластерной структуры воды, согласно которой молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  в жидкой фазе связаны в кластеры – ассоциаты определенной конфигу-

рации, определенных размеров и продолжительности жизни. Но структурные детали кластеров и динамика их поведения до сих пор являются предметом изучения и дискуссий. Хотя для выяснения вопроса используются самые современные экспериментальные методы и компьютерное моделирование, каждый из них и даже все они в совокупности отображают лишь отдельные аспекты поведения воды, и не в состоянии дать цельную, не противоречащую экспериментальному массиву теорию структуры этой удивительной жидкости [13, 14]. Скептически настроенные исследователи на основании того, что водородная связь в жидкой воде очень быстро переключается, уверены в невозможности существования в воде какой-либо устойчивой структуры [19]. Зато у сторонников существования в жидкой воде устойчивых структур появились дополнительные аргументы из области материаловедения, которое может предложить сравнительный анализ новых данных по структурам стекол и некоторых жидкостей. Оказывается, что многие стекла и некоторые жидкости являются наноккомпозитами, их структуры содержат несколько аморфных фаз, и подобного можно ожидать для воды. Кластерная структура воды может быть схематически изображена, как модель с микро- и наногетерогенными областями, в которых заключены димеры, тримеры, тетрамеры молекул воды, и ассоциаты с еще большим количеством молекул (см. рис. 3) [18].

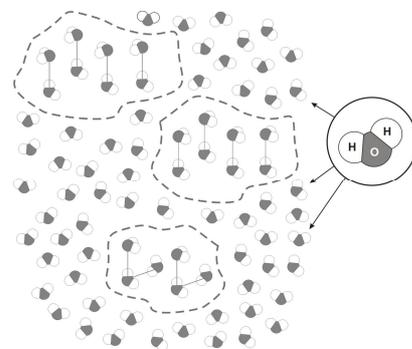


Рис. 3. Кластерная структура воды (схематически)

На одну молекулу воды в каждом таком кластере приходится определенная средняя энергия, а между кластерами действуют связи Ван-дер-Ваальса. Быстрое переключение водородных связей внутри кластеров не разрушает самих кластеров [18]. Но, при механоактивации весь этот ансамбль кластеров должен перестраиваться и, по аналогии с фазовыми переходами в твердых телах, должны протекать соответствующие процессы преобразования энергии, как при структурных переходах. Материаловедение подсказывает исследователям, что необходимо учитывать влияние на структуру воды

растворенных в ней атмосферных газов, и наличие в ней газовых пузырьков. Речь идет о бабстонах – стабильных нанопузырьках воздуха,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  и др. газов, которые в виде устойчивых коллоидов могут влиять на структуру воды и которые снижают порог кавитации [18]. Недавно получены экспериментальные подтверждения, что наноразмерные бабстоны объединяются в воде и водных растворах электролитов в микроразмерные кластеры, параметры которых зависят от концентрации ионов в воде (см. рис. 4) [20].

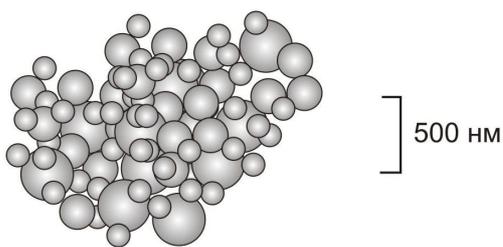


Рис. 4. Бабстонный кластер в воде [20]

Здесь перед нами открываются новые возможности для исследований, ведь бабстоны несут поверхностные заряды, и перестройка бабстонных кластеров в процессе кавитации должна сопровождаться заметными преобразованиями электрической энергии. По мнению автора, исследования в указанном направлении могут дать новые результаты в понимании механизмов преобразования и выделения энергии.

### Заключение

На основании проведенного анализа можно сформулировать выводы:

- имеющийся массив экспериментальных данных по кавитации, в том числе, кавитации в воде, на данном этапе не позволяет предложить единственный механизм преобразования энергии при кавитации. Известные модели применимы лишь в тех или иных условиях протекания процесса кавитации;
- в кавитационных устройствах, предназначенных для выделения тепловой энергии (теплогенераторах) в специальных условиях может происходить тепловыделение, превышающее затраты энергии на возбуждение кавитации;
- дополнительное тепловыделение, в принципе, может быть связано с обратимыми структурными изменениями в воде, а также с изменениями структуры бабстонных кластеров, но вопрос этот требует дальнейших исследований.

Дальнейшие научные исследования автор предполагает направить на углубление анализа механизмов преобразования и выделения энергии при кавитации. В частности, на детальное изучение вклада структурных изменений среди бабстонных кластеров в воде, с целью получения численных оценок энергопреобразования и использования их в кавитационных теплогенераторах.

### Литература

1. *Физический энциклопедический словарь [Текст] / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Сов. Энциклопедия, 1984. – 944 с.*
2. *Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (обзор) [Текст] / Ю. А. Жулай, В. Ю. Скосарь // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8(105). – С. 7-15.*
3. *Маргулис, М. А. Сонолюминесценция [Текст] / М. А. Маргулис // Успехи физических наук. – 2000. – № 3(170). – С. 263-287.*
4. *Карасев, Н. И. Вероятностно-детерминированный подход при планировании экспериментов для изучения явлений механоактивации вихревого движения жидких сред [Электронный ресурс] / Н. И. Карасев, А. А. Калинин. – Режим доступа: [http://www.rusnauka.com/14.NTP\\_2007/Tecnic/21597.doc.htm](http://www.rusnauka.com/14.NTP_2007/Tecnic/21597.doc.htm). - 12.05.2014.*
5. *Вихревые теплогенераторы (термеры). Проблемы и перспективы [Электронный ресурс] / А. А. Халатов, А. С. Коваленко, С. В. Шевцов, Н. В. Франко. – Режим доступа: <http://deger.com.ua/article/vortex-heat-thurmer-problems-and-prospects/>. – 12.05.2014.*
6. *Халатов, А. А. Результаты испытаний вихревого теплогенератора ТПМ 5,5-1 [Электронный ресурс] / А. А. Халатов, А. С. Коваленко, С. В. Шевцов // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 8 (84). – Режим доступа: [http://www.ecoteplo.ahosta.ru/20070915/st3\\_Chalatow.htm](http://www.ecoteplo.ahosta.ru/20070915/st3_Chalatow.htm). - 12.05.2014.*
7. *Козлов, С. В. О возможности создания «сверхъединичных» теплогенераторов [Электронный ресурс] / С. В. Козлов. – Режим доступа: [http://samlib.ru/k/kozlow\\_serzej\\_wladimirowich/cverhe\\_dinichnieteplogeneratori.shtml](http://samlib.ru/k/kozlow_serzej_wladimirowich/cverhe_dinichnieteplogeneratori.shtml). – 12.05.2014.*
8. *Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М. : Физматлит, 2007. – 416 с.*
9. *Механоактивация нефтепродуктов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://sivorovaleksey.blogspot.com/p/blog-page\\_18.html](http://sivorovaleksey.blogspot.com/p/blog-page_18.html). – 12.05.2014.*
10. *Калачева, Л. П. Получение водорода механоактивацией конденсированных фаз воды [Электронный ресурс] / Л. П. Калачева, В. П. Корякина, А. Ф. Федорова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2009. – № 2. – 6 с. – Режим доступа: <http://ogbus.ru/authors/Kalacheva/>*

Kalacheva\_1.pdf. – 12.05.2014.

11. Селивановский, Д. А. Об устойчивости атмосферы [Электронный ресурс] / Д. А. Селивановский, П. А. Стунжас. – Режим доступа: [http://www.ipfran.ru/staff/img/atm\\_n1.pdf](http://www.ipfran.ru/staff/img/atm_n1.pdf). – 12.05.2014.

12. Химическая энциклопедия: В 5 т.: Т. 3: Меди-Полимерные [Текст] / Редкол. : И. Л. Кнунянц (гл. ред.) и др. – М.: Большая Российская энцикл., 1992. – 639 с.

13. Захаров, С. Д. Кластерная структура воды (обзор) [Электронный ресурс] / С. Д. Захаров, И. В. Мосягина // Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН. – 2011. – Режим доступа: [http://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/35\\_11\\_pr.pdf](http://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/35_11_pr.pdf). – 12.05.2014.

14. Мосин, О. В. Современная модель воды [Электронный ресурс] / О. В. Мосин. – Режим доступа: <http://www.scorcher.ru/art/chemistry/chemistry1.php>. – 12.05.2014.

15. Першин, С. М. Обнаружение спектральной компоненты льдоподобных комплексов в ОН-полосе воды при температуре до 99°C / С. М. Першин, А. Ф. Бункин, В. А. Лукьянченко // Нелинейный мир. – 2009. – № 2/7. – С. 79-90. – Режим доступа: [www.biophys.ru/archive/h2o-00003e.pdf](http://www.biophys.ru/archive/h2o-00003e.pdf). – 12.05.2014.

16. Квазипереходы в простых жидкостях при высоких давлениях [Текст] / В. В. Бражкин, Р. Н. Волошин, А. Г. Ляпин, С. В. Попова // Успехи физических наук. – 1999. – № 9 (169). – С. 1035-1039.

17. Прямое исследование механизма образования уплотненных стекол SiO<sub>2</sub> под давлением [Текст] / Ф. С. Елькин, В. В. Бражкин, Л. Г. Хвостанцев, О. Б. Циок, А. Г. Ляпин // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – № 7/75. – С. 413-418.

18. Структура воды – новый взгляд с точки зрения материаловедения [Электронный ресурс] / Р. Рой, У. А. Тиллер, И. Белл, М. Р. Гувер // Materials Research Innovations. – December 2005. – Vol. 9, issue 4. – P. 577-608. – Режим доступа: [http://homeoint.ru/homeopathy/essence/structure\\_liquid\\_water.htm](http://homeoint.ru/homeopathy/essence/structure_liquid_water.htm). – 12.05.2014.

19. Маленков, Г. Г. Споры о структуре воды [Электронный ресурс] / Г. Г. Маленков. – Режим доступа: <http://scisne.net/a577>. – 12.05.2014.

20. Кластерная структура стабильных нанопузырей растворенного газа в глубоко очищенной воде [Текст] / Н. Ф. Бункин, Н. В. Суязов, А. В. Шкирин, П. С. Игнатъев, К. В. Индукаев // ЖЭТФ. – 2009. – № 5(135). – С. 917-937.

Поступила в редакцию 12.05.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. А. Задонцев, МНПК «ВЕСТА», Днепропетровск.

## МОЖЛИВІ МЕХАНІЗМИ ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ В КАВІТАЦІЙНИХ ПРИСТРОЯХ

*В. Ю. Скосар*

Проведено якісний аналіз механізмів перетворення й виділення енергії при кавітації. Показано, що механічна енергія рідини, що кавітує, може перетворюватися в електричну, світлову і теплову енергії. Зроблено припущення, що при багатопухирцевої кавітації можливо виділення тепла рідиною, що перевищує витрати енергії на збудження кавітації. Надлишок виділення тепла може бути пов'язан зі структурними перетвореннями в рідині. Для води це може бути обумовлено перетвореннями її кластерної структури, структури газових включень у вигляді нанопухирців – бабстонів. Результати аналізу можуть бути використані для розробки раціональних способів енерговиділення в кавітаційних пристроях.

**Ключові слова:** перетворення і виділення енергії, багатопухирцева кавітація, кавітаційні пристрої, структура води.

## POSSIBLE MECHANISMS OF ENERGY RELEASE IN CAVITATION DEVICES

*V. Yu. Skosar*

The qualitative analysis of mechanisms of transformation and energy release under cavitation was carried out. It was shown that mechanical energy of cavitating liquid can be transformed in electric, light and thermal energy. The assumption is made that at multi-bubble cavitation the heat release from the fluid that exceeds the expenditures of energy for initiation of cavitation is possible. Excess of heat release can be related to reversible structural transitions in the fluid. For water it can be caused by transformations of its cluster structure, structure of gas inclusions in the form of nanobubbles – bubbles stabilized by ions. The analysis data can be used for development of rational methods of energy release in cavitation devices.

**Key words:** transformation and energy release, multivesiculate cavitation, cavitation devices, water structure.

**Скосар Вячеслав Юрьевич** – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг», Днепропетровск, Украина, e-mail: [svu@westa-inter.com](mailto:svu@westa-inter.com).