

УДК 532.5: 00494

m.savin50@mail.ru

**О ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСАХ И ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ
КАВИТАЦИИ В ПРАКТИКЕ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ****ON PROBLEMATIC ISSUES AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION
OF THE PHENOMENON OF CAVITATION IN THE PRACTICE
OF FIRE PROTECTION**

*Савин М. А., кандидат технических наук, доцент,
Курбатова Д. К.,
Уральский институт ГПС МЧС России,
Кацнельсон И. Э.,
Екатеринбург*

*Savin M., Kurbatova D.,
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Katsnelson I.,
Yekaterinburg*

В публикации приведены примеры практического применения явления кавитации в различных отраслях экономики. Констатируется, что кавитация относится к физическим явлениям, промышленное использование которых в настоящее время активно развивается, не будучи до конца исследованным. Приведены примеры конструктивно-технических решений на уровне изобретений РФ для применения кавитации в пожарной практике. На основании анализа публикаций сделан вывод о том, что изучением явления кавитации применительно к пожарно-спасательной технике в России практически никто не занимается. Намечены направления исследований и разработки новых и модернизации уже существующих узлов, оборудования и технологий за счет применения данного явления для решения актуальных задач противопожарной службы.

Ключевые слова: кавитация, кавитаторы, пожарное оборудование, пеногенератор под-
слойного тушения, «холодная» плазма, гидроудары, дезинтеграция, деструкция веществ,
структура жидкости, эрозия, свободные радикалы, коррозия.

This publication provides examples of the practical application of the phenomenon of cavitation in various sectors of the economy. It is stated that cavitation refers to physical phenomena, the industrial use of which is currently actively developing, without being fully investigated. Examples of constructive and technical solutions at the level of inventions of the Russian Federation for the use of cavitation in fire practice are given. From the analysis of publications, it is concluded that practically no one is engaged in the study of the phenomenon of cavitation in relation to fire and rescue equipment in the Russian Federation. The directions of research and development of new and modernization of existing units, equipment and technologies through the application of this phenomenon to solve urgent problems of the fire service are outlined.

Keywords: cavitation, cavitators, fire-fighting equipment, sub-layer foam generator, "cold" plasma, water hammer (hydraulic strikes), disintegration, substance destruction, fluid structure, erosion, free radicals, corrosion.

Проблемы обеспечения должного уровня пожарной безопасности населения, объектов и территорий становятся все более актуальными и сложными.

В соответствии с ростом потенциальных и реальных опасностей для экономики страны должны возрастать, преимущественно с опережением, возможности пожарно-спасательных подразделений для того, чтобы обеспечить успешное проведение аварийно-спасательных работ, а также ликвидацию пожаров, аварий и катастроф с минимальным ущербом.

Развитие пожарно-спасательной техники и технологий неразрывно связано с общим техническим прогрессом. Причем обычно данный процесс в пожарной охране идет эволюционно. Исторически так сложилось, что в пожарном деле широко и успешно применяются идеи и технические решения из других отраслей экономики.

Все работы по совершенствованию технической составляющей противопожарной службы опираются на прочный научный фундамент, на глубокие теоретические и экспериментальные исследования, которые все шире ведутся в последнее время учеными разных специальностей.

Направления совершенствования пожарно-спасательных технологий всегда базируются на обобщении опыта эксплуатации машин и результатах специально проведенных исследований. Затем опыт тушения пожаров и эксплуатации оперативной спецтехники, как правило, отражается в уставах и наставлениях, является основой постановки последующих исследовательских задач по совершенствованию конструкции их агрегатов и узлов.

Обоснованные, разработанные и апробированные в эмпирических исследованиях технические решения обеспечат минимизацию пожарных рисков и материальных потерь от ЧС, в том числе на труднодоступных северных и арктических территориях при реализации крупных инфраструктурных и экономических проектов [1].

В данной обзорной публикации предпринята попытка определения направлений разработки новых и модернизации уже существующих узлов, оборудования и технологий за счет применения явления кавитации для решения актуальных задач противопожарной службы.

Явление кавитации впервые обнаружил английский ученый О. Рейнольдс в 1894 г. на британских миноносцах, когда флот переходил на паровую тягу.

Однако, прежде чем подступиться к данному явлению, целесообразно изложить некоторые научные данные, связанные с исследуемым вопросом [2].

Так известно, что в зависимости от внешних условий (температуры и давления) любое вещество может находиться в жидком, газообразном, твердом агрегатных состояниях, а также в виде плазмы, причем одновременно – в двух или даже трех фазах.

Плавлением называется переход вещества из твердого состояния в жидкое, *испарением* – из жидкого в газообразное, и сублимацией – из твердого в газообразное. Процессы обратной направленности соответственно называются кристаллизацией, конденсацией и десублимацией.

Пар — газообразное состояние вещества в условиях, когда газовая фаза может находиться в равновесии с жидкой или твердой фазами того же вещества, то есть при температурах ниже критической температуры вещества. Понятие «пар» практически не отличается от понятия «газ». Пар называется *насыщенным*, если он находится в термодинамическом равновесии с жидкой (или твердой) фазой того же вещества. Давление насыщенного пара является функцией температуры. Известно также, что при заданном атмосферном или ином внешнем давлении температура кипения любой жидкости постоянна, но повышается с повышением давления и понижается с его понижением. Если внешнее давление становится ниже давления насыщенного пара, то будет иметь место кипение (жидкости) или сублимация (твёрдого

тела); а когда оно будет выше – напротив, конденсация либо десублимация. Таким образом, при температуре 20 °С и в случае, если давление составит 17,39 мм рт. ст., т. е. станет значительно ниже атмосферного – 760 мм. рт. ст. (0,1 МПа), то вода может закипеть.

Справка. При полном испарении 1 литра воды можно получить 1244,4 литров пара. Действительно, вес одного литра пресной воды составляет 1000 г. Объем 22,4 л занимает одна грамм-молекула газа (пара). Одна молекула воды весит 18 моль

(18 г). Отсюда можно составить пропорцию: 18 г занимают объем 22,4 л, а 1000 г – соответственно X л. Отсюда X = 1244,4 л. или 1,2444 м³. Таким образом, после конденсации пара его объем быстро весьма значительно уменьшается – в 1244,4 раза.

Для уяснения явления кавитации (от лат. cavitas – пустота) рассмотрим горизонтальную трубу с зауженным участком (рис. 1). Ось трубы примем за плоскость сравнения. Для сечений 1 – 1 и 2 – 2 потока жидкости уравнение Бернулли будет выглядеть следующим образом:

$$z_1 + p_1 / \rho g + \alpha v_1^2 / 2g = z_2 + p_2 / \rho g + \alpha v_2^2 / 2 + \Sigma h_{ном} = H = const.$$

Скорость жидкости в узком сечении значительно возрастает, т. е. увеличивается ее динамическое давление, и, соответственно, статическое давление p уменьшается. Если абсолютное давление p убавится до давления насыщенного пара $p_{н.п.}$, т. е. при $p = p_{н.п.}$, (рис. 1) возникает явление кавитации. Из уравнения также видно, что снижение давления может произойти и по

другим причинам, а не только при увеличении скорости движения жидкости. Например, при значительном увеличении геометрической высоты всасывания насоса, при больших потерях напора (если на трубопроводе много местных сопротивлений), что также может привести к кавитации. Справка: для воды при $t = 20\text{ °C}$ величина $p_{н.п.} = 2\ 400\text{ Па}$, для сравнения $p_{атм} = 101\ 320\text{ Па}$.

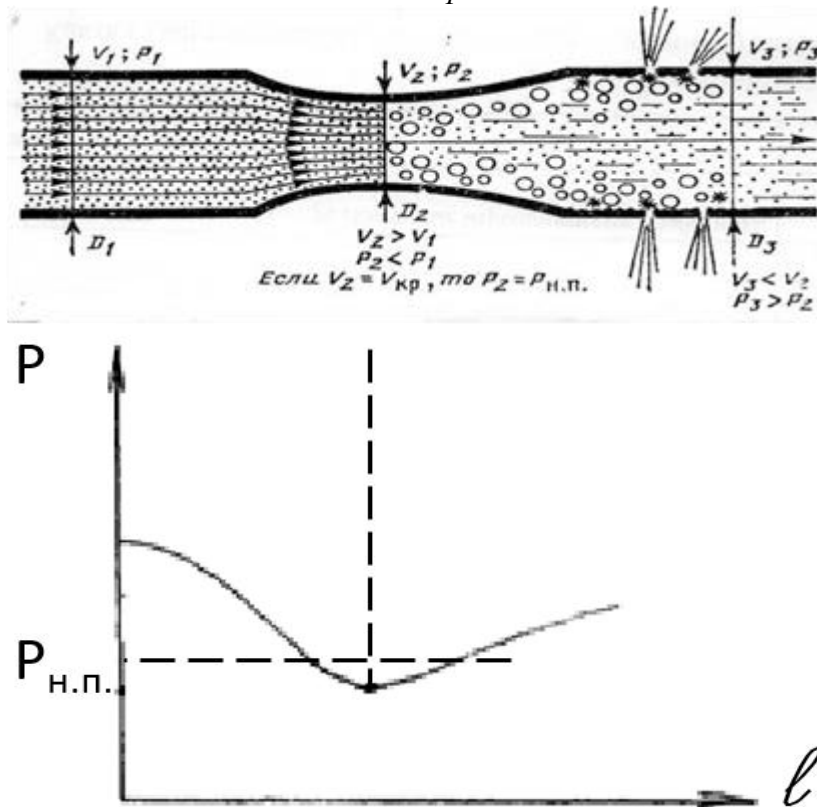


Рисунок 1. Физика явления кавитации

Итак, кавитация является сложным комплексом следующих явлений:

1) в потоке жидкости образуется значительное количество полостей, так называемых каверн или кавитационных пузырьков микроскопических размеров. В трудах И. М. Федоткина [3] показано, что радиус каверны, при гидродинамическом получении кавитации, в среднем составляет $20 \cdot 10^{-6}$ м, наполненных парами жидкости и газами, ранее растворенных в ней (из-за этого вода приобретает белесый оттенок), выделившимися из жидкости в тех областях, где местное давление равно или меньше давления ее насыщенных паров (рис. 1). Образование пузырьков внешне весьма похоже на кипение жидкости. Причем при заполнении микропузырьков газами и парами они растут. Вместе с потоком жидкости каверны перемещаются, увеличиваются в размерах, образуют крупные пузыри и полости;

2) локальное увеличение скорости потока, обусловленное заужением поперечного сечения трубы выделившимися кавернами газа или пара и хаотическое движение жидкости;

3) последующая конденсация. Попав в область повышенного давления, кавитационные микропузырьки значительно сжимаются, а далее конденсируются (схлопываются). При их коллапсе в зоне давле-

ния происходит быстрое встречное движение частиц жидкости к центру пузырька. Давление в каверне и вблизи нее достигает очень больших величин, по некоторым оценкам более 10^3 МПа. При этом также выделяется теплота и появляются связанные с нею точечные температуры в десятки тысяч Кельвинов – по сути, это «холодная» плазма. Следовательно, сконцентрированная в ничтожном объеме кинетическая энергия элементарных струек освобождается и переходит частично в тепловую энергию, а частично – в энергию сжатия. Указанный коллапс каверн приводит к генерации гидроударов с ультразвуковой частотой и, как следствие, к созданию волн сжатия и растяжения в жидкости. Таким образом, реализуются нестационарные гидромеханические процессы, которые в свою очередь, интенсифицируют тепло-массообменные процессы. И такая ударная волна в форме сферы разрушает (рис. 2) твердую поверхность – так называется кавитационная эрозия. Такие точечные высокоэнергетические импульсы могут привести к серьезным разрушениям. Следовательно, энергия конденсирующих микропузырьков реализуется в виде ударных волн, локального нагрева пара и газа, содержащихся в сжимающихся полостях, на возбуждение сонолюминесценции, на генерацию свободных радикалов, а также на создание шума;

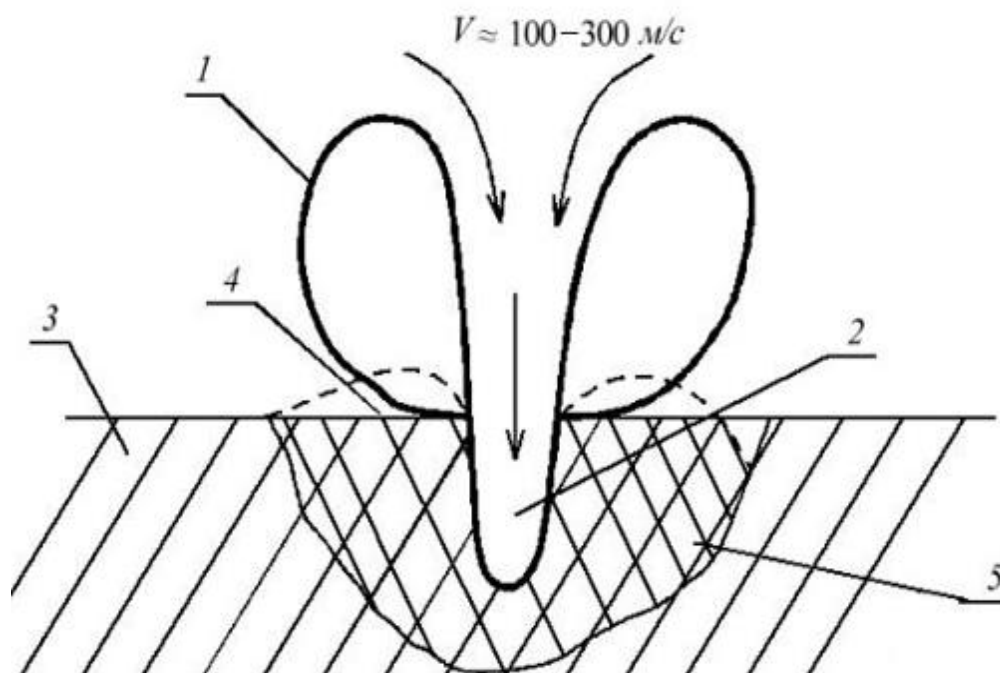


Рисунок 2. Механизм кавитационной эрозии при схлопывании каверны (весьма значительное увеличение):

1 – сферическая граница раздела паровой и жидкостной фаз; 2 – фронт потока кумулятивных микроструек; 3 – металлическая деталь; 4 – первоначальная поверхность детали; 5 – локальное разрушение детали – объем скола металла (щербина)

4) кроме того, в зоне кавитации имеет место химическое коррозионное разрушение металла кислородом воздуха, который выделился из жидкости в микропузырек при его прохождении в зонах пониженного давления [8]. Действующий одновременно с импульсными механическими воздействиями, данный комбинированный процесс понижает прочность металла деталей.

Кавитация называется гидродинамической, если снижение давления происходит по причине местного повышения скорости потока. Кавитация называется акустической, если понижение давления связано с прохождением в жидкости акустических волн большой интенсивности. Науке известны и другие причины ее возникновения.

Действительно, физическое явление кавитации успешно и эффективно применяются в самых разных отраслях экономики, инфраструктуры, военной сфере и тп. [2–15].

Так, торпеда «Шквал», двигаясь внутри кавитационного пузыря, может развивать скорость до 270 узлов (500 км/ч).

В нефтеперерабатывающем производстве: в процессах приготовления котельного и печного топлив из отходов нефтепродуктов, отработанного масла, масел и смазок, водотопливных и биотопливных эмульсий, при переработке подтоварной воды, отстоя бензо – и нефтецистерн; утилизации отходов.

При обработке топлива кавитацией имеют место снижение вязкости углеводородного топлива, а также деструкция углеводородов, т.е. рвутся длинные ассоциаты молекул, что обеспечивает увеличение дисперсности его распыления форсунками и более совершенное сгорание.

В теплоэнергетической отрасли – для нагрева и теплоносителей и воды.

В машиностроении кавитационные устройства применяются для очистки поверхностей деталей.

Кавитационные воздействия имеют значительную разрушительную силу, которую применяют для диспергирования твердых тел, находящихся в жидкости. Данный эффект используется при обработке котельного топлива для повышения тепловой способности его горения.

В строительном производстве – в приготовлении активированной водцементной суспензии при производстве бетона и пенобетона, пластификаторов, мастик, пигментов, водоэмульсионных красок и т. п.

Кавитаторы применяются в технологических процессах в нефтехимпереработке, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности для приготовления рецептур композиций.

Кавитационная дезинтеграция широко реализуется при производстве хлебопродуктов, алкогольной промышленности и переработке урожая, грубых пищевых отходов, при производстве кормов и т. п.

В пищевых переделах кавитация имеет место при гомогенизации цельного молока, восстановлении сухого молока, в приготовлении обрата, йогурта, соков, сыров, мясных, рыбных, фруктовых и овощных паст и пюре, теста непосредственно из зерна и круп, при мокром помоле зерна, а также для дезинфекции воды и пищевых сред, технологии пищевых продуктов, извлечения пищевкусных веществ из сырья и т.п.

В косметике, парфюмерии и фармакологии – при приготовлении кремов, вазелина, мазей, шампуней, бальзамов, лосьонов, гелей, лекарственных форм (растворов).

А еще кавитацию применяют в электрогенерации, в технологии очистки сточных вод, в процессе бурения скважин, при крекинге углеводородов, кавитационном синтезе наночастиц углерода гидроударом и т. п.

Кавитация является гидродинамическим явлением, поскольку она основа функции гидродинамических свойств рабочих органов того или иного агрегата. Кавитация – это явление термодинамическое, т. к. она еще связана с физическими свойствами жидкости.

Кавитация вообще часто возникает в местах контакта с жидкостью быстро движущихся твердых объектов [9, 10] (турбины, рабочие колеса насосов (рис. 3), гребные винты плавсредств, подводные крылья и даже узлы ядерных реакторов). Последствия такого явления известны и могут быть самых разных масштабов – от точечной гидравлической эрозии поверхностей деталей после многих лет работы до катастрофических последствий и выхода из строя внушительных агрегатов и конструкций.



Рисунок 3. Повреждения рабочего колеса насосом наносимые эффекта кавитации

Кавитационный шум проявляется в начальной стадии кавитации в виде характерного потрескивания в зоне входа в рабочее колесо насоса.

Начальная стадия кавитации, которую называют местной кавитацией, сопровождается кавитационной эрозией, но не приводит к существенному изменению внешних параметров насоса. Стадия кавитации, соответствующая кавитационному срыву работы насоса, носит название развитой.

Необходимо отметить, что многие вопросы теории кавитации, относящиеся, например, к первичному ее зарождению, масштабному эффекту, переходу отдельных форм кавитации из одной в другую и т. п., в настоящее время разработаны недостаточно. Поэтому кавитационные свойства насосов характеризуют параметрами, соответствующими условиям их работы, предшествующим появлению развитой кавитации в проточной части.

Итак, в лопастных насосах парообразование обычно зарождается на входных частях лопаток рабочего колеса и нарушает нормальное движение жидко-

сти в рабочем колесе. Кавитационные явления особенно проявляются, когда центробежные насосы работают с существенным превышением величин напоров против номинального. В этом случае из-за градиента давлений между напорными и всасывающими полостями происходит снижение КПД по причине увеличения перетеканий и скоростей через щелевые уплотнения между рабочим колесом и корпусом. Кавитация, возникающая при такой рециркуляции внутри насоса, может привести к повреждению рабочего колеса вплоть до разрушения. Также кавитация может иметь место и в направляющем аппарате, хотя здесь она наблюдается относительно редко. Таким образом, кавитация может возникать в проточной части спецагрегата как на неподвижных, так и на подвижных его элементах.

Кроме того, из-за кавитации происходят разрушения подшипников и уплотнений. При сильной вибрации иногда случается поломка вала. Таким образом, нельзя длительное время эксплуатировать насос на данном режиме.

Отсюда, кроме факторов, зависящих от конструкции насоса, возможными

причинами появления кавитации могут быть перечисленные ниже:

- увеличение расхода насоса сверх номинального наряду с повышением угловой частоты вращения вала (ввиду возрастания скорости потока на входе в колесо и одновременного увеличения разрежения на всасывании);

- повышение гидравлического сопротивления линии всасывания (в результате монтажа дополнительной арматуры либо засорения всасывающей сетки или деформирования линии в целом – прогибы и провисания всасывающих рукавов и т. п.);

- высокая температура перекачиваемой жидкости, в т. ч. при длительной работе насоса с водой вхолостую, т. е. «на себя».

Следовательно, можно заключить, что в лопастных насосах образуются кавитационные микропузырьки, причем их тем больше, чем:

- выше угловая скорость вала (т. е. чем выше относительная скорость движения рабочего колеса и жидкой среды);

- значительнее температура жидкости;

- больше градиент давлений на выходе спецагрегата и на его входе.

Кавитацию можно идентифицировать по появлению треска и даже грохота, срыву параметров насоса: падению напора, расхода, мощности, КПД и шума, переходящего иногда в сильный.

На таких неустановившихся режимах работы спецагрегата, как гидравлический удар, режимах пуска, останова и т. п. кавитация также может иметь место.

При длительной работе насоса в условиях кавитации происходит разрушение практически любого материала, из которого выполнена обтекаемая потоком поверхность. Явления, определяющие интенсивность указанного разрушения, сложные. Главной ее причиной является механическое усталостное разрушение материала от воздействия циклов сжатия.

Скорость разрушения материалов различна. Особенно сильно явление кавитации действует на строганный чугун, углеродистую сталь и алюминий. Наиболее устойчивы в этом отношении нержавеющей сталь и бронза.

Развитая кавитация обычно сопровождается значительным уровнем шумов и повреждением насоса и приводит к срыву его работы; средняя кавитация ведет к лишь к небольшому снижению подачи, высоты, производительности и преждевременному износу. Начальная стадия кавитации опасности не представляет, а появление значительных объемов паровых областей приводит к некоторому снижению параметров агрегата.

Науке и технике известны ряд кавитаторов, имеющих разную конструкцию и, соответственно, принципы действия [3, 7, 8]:

- ультразвуковые или магнитоотрикатели. В них кавитация генерируется под действием ультразвуковых колебаний;

- пассивные. В данных установках не предусмотрены вращающиеся части, а кавитационные эффекты реализуются посредством труб разных диаметров, сопел, перегородок, ребер, винтовых завихрителей и т. п.;

- активные. Эти устройства делятся на лопастные и гидродинамические. Первые включают статор и одно либо несколько рабочих колес. За счет вращения подвижной части установки возникает эффект кавитации. В гидродинамических установках за счет резкого изменения скорости потока образуются полости разрежения.

Ультразвуковые устройства имеют весьма высокую стоимость и небольшую производительность. Кроме того, они дороги в техническом обслуживании. Установки такого типа главным образом применяются в фармацевтической и парфюмерно-косметической промышленности.

Пассивные (статические) кавитаторы предназначены для структурных преобразований потока, для трансформации физико-химических параметров жидкости,

посредством реализации гидромеханических и массообменных процессов.

За счет интенсивного вихреобразования и кавитации пассивные (статические) кавитаторы достигают многократного преобразования эпюр скоростей, а

также изменения векторов линий тока потока и смешиваемых жидких компонентов.

Современные конструкции пассивных (статических) кавитаторов обеспечивают следующие технические характеристики и технологические возможности (табл. 1).

Таблица 1
Основные характеристики пассивных (статических) кавитаторов

Обрабатываемая (основная) жидкость	Вода, нефть, нефтепродукты, растительные масла, водные растворы кислот, щелочей и других веществ, смеси жидкостей
Плотность обрабатываемой жидкости, кг/м ³	500...1200
Кинематическая вязкость обрабатываемой жидкости, сСт	0,1...20
Массовая доля твердых частиц в обрабатываемой жидкости, %, не более	20
Размер твердых частиц, мм, не более	1
Температура обрабатываемой жидкости, °С	От -10 до +200
Давление на входе, МПа	от 0,5 до 3,2
Потери давления, МПа	0,4 ... 3,1
Условный проход входного и выходного патрубков, мм	Ду 15 ... Ду 80
Условный проход патрубка ввода дополнительных жидких компонентов, мм	Ду 10 ... Ду 25
Средний срок службы, лет	10...30

В конструкциях статических кавитаторов не закладывается требование высокой точности изготовления его элементов. Мехобработка при их изготовлении минимизирована в сравнении с роторной конструкцией. Полное отсутствие вращающихся частей не требует решения вопросов уплотнения и балансировки. Ресурс кавитатора значительно возрастает.

Достоинства пассивных (статических) кавитаторов:

- простота конструктивного исполнения;
- легкость обслуживания;
- высокая герметичность и прочность;
- работоспособность при больших давлениях и температурах, а также со взрыво-

пожароопасными и токсичными жидкими средами;

- высокая удельная производительность.

В пассивных кавитаторах обработка жидкости достигается многофакторным импульсным воздействием, а именно кавитацией, вихревым движением, разномасштабными пульсациями давления, ударными импульсами и нелинейными гидроакустическими эффектами.

В конструкциях таких кавитаторов самыми известными и широко применяемыми элементами для создания неустойчивого потока являются винтообразные элементы либо реализация тангенциального ввода жидкости в рабочую камеру (рис. 4, 5).

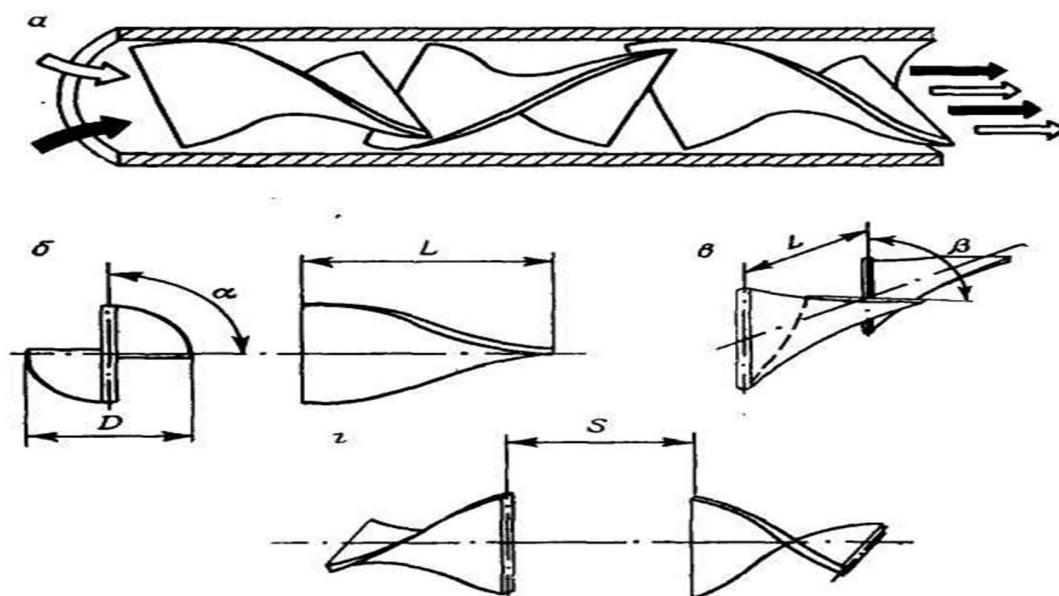


Рисунок 4. Принципиальная схема пассивного (статического) кавитатора-смесителя (а), конструкция (б) и схемы установки (в, г) смесительных элементов: D – внутренний диаметр трубы «в свету»; L – длина элемента; α – угол закрутки спирали; β – угол контакта торцовых кромок; S – зазор между смежными элементами

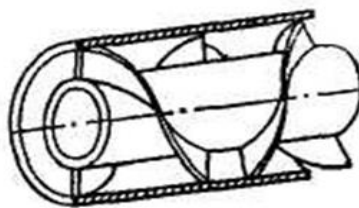


Рисунок 5. Конструктивное решение, согласно которому винтовые элементы расположены на поверхности центральной трубы либо вала кавитатора

Перегородки типа пластин со сквозным отверстием либо отверстиями являются весьма эффективными элементами статических кавитаторов. Подобная перегородка может быть дискообразной

формы, в котором имеются ряд каналов для движения потока (рис. 6). Каналы чаще всего равномерно распределены на его плоскости и могут иметь различную форму и размеры.

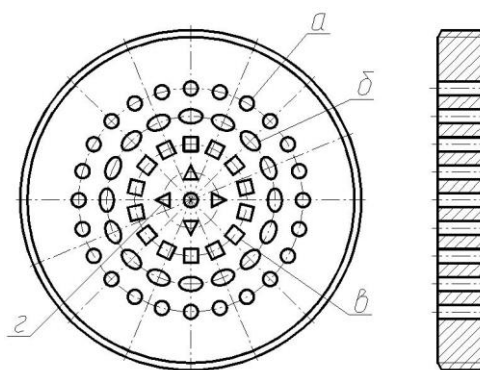


Рисунок 6. Перегородка с отверстиями различной формы поперечного сечения:
а – каналы цилиндрической формы; *б* – каналы формы эллипса;
в – каналы прямоугольной формы; *г* – каналы треугольной формы

После прохождения потока через отверстия в диске в жидкости возникают кавитация, турбулентность (рис. 7) и отрывные течения. Данные эффекты интенсифицируют тепло- и массообменные процессы и способствуют интенсивному дроблению ассоциатов молекул жидкости и гомогенизации.

Резкое расширение или сужение канала, влияющее на скорости потока и возникновение мощного вихреобразования, также позволяет эффективно перемешивать жидкие среды, осуществлять деструкцию веществ.

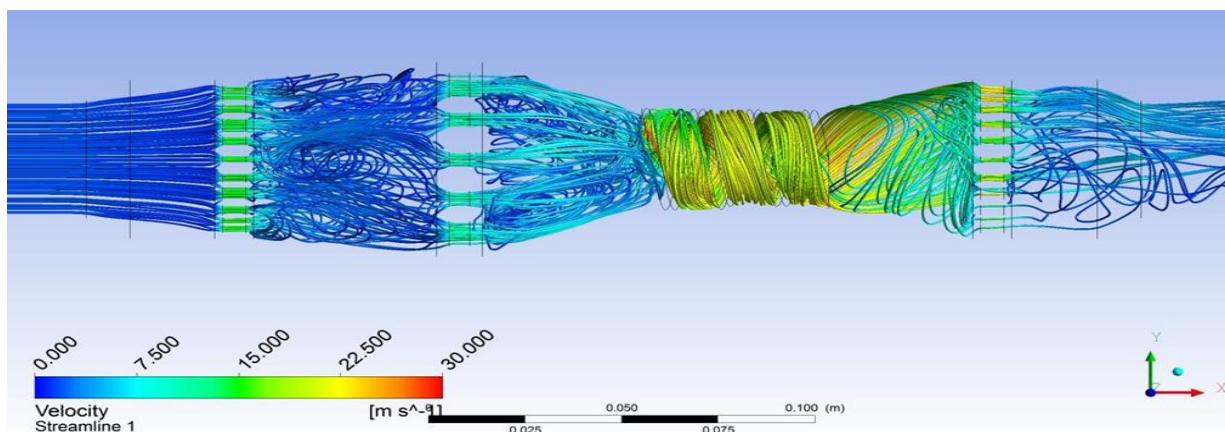


Рисунок 7. Пример линий тока жидкости для пассивного (статического) кавитатора-смесителя

Вместе с тем недостатки пассивных кавитаторов ограничивают их применение, в частности:

- практически нереально настроить параметры изделия в зависимости от плотности, вязкости и других свойств жидких продуктов;
- продолжительность технологической операции – что для получения продукции необходимого качества порой требуется несколько раз пропускать жидкость через установку;
- формирование внутренних отложений на стенках аппарата, в результате это приводит к ухудшению качества продукта.

Лопастные кавитаторы относятся к активным. У данных аппаратов рабочими органами являются колеса с лопатками определенных конструкций (рис. 8), благодаря вращению которых возникают области разряжения. Лопастные кавитаторы несколько эффективней пассивных, вместе с тем у них отмечают недостатки:

- более интенсивный износ лопастей, поскольку именно они подвержены кавитационным воздействиям;
- полости с вакуумом образуются с тыльных сторон лопаток крыльчатки.

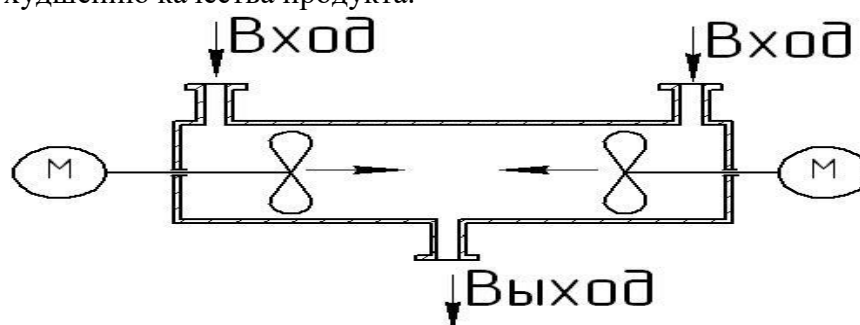


Рисунок 8. Принципиальная схема устройства лопастных кавитаторов

Гидродинамические кавитаторы включают неподвижный и подвижный корпуса (рис. 9), статор, вал, подшипники, электропривод. В статоре и роторе имеются сквозные отверстия. При вращении ротора периодически окна открываются и закрываются. При закрытии окон происходят резкие остановки потоков жидкости и возникают кавитационные эффекты. При

конденсации каверн возникают гидроудары, которые дезинтегрируют крупные молекулы и разрывают структурные связи между ними. Таким образом, в результате такой обработки изменяется структура жидкости. Кроме того, благодаря кавитации выделяются растворенные газы и протекают химические реакции, что понижает

содержание нежелательных примесей в потоке.

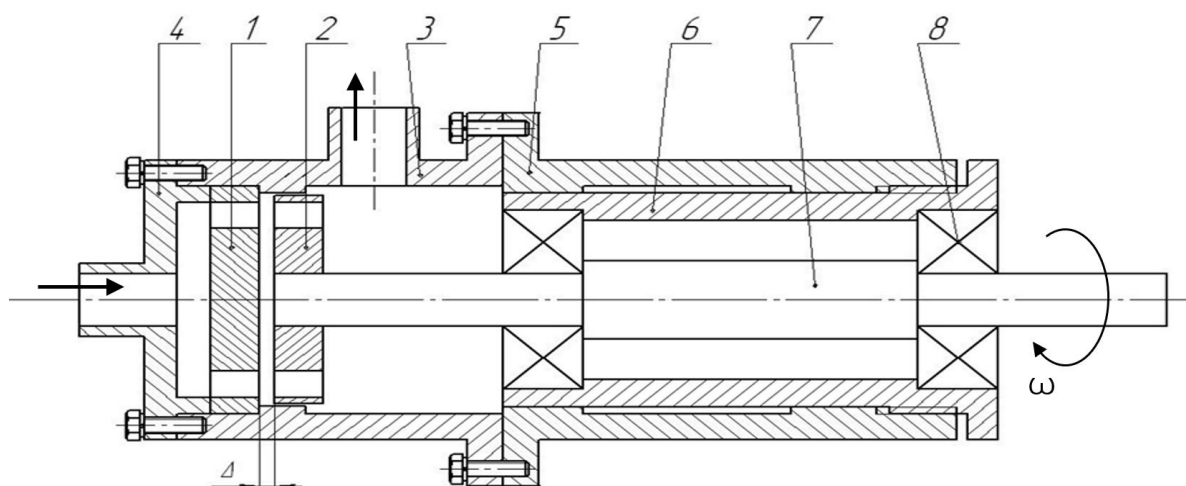


Рисунок 9. Принципиальное устройство (вариант) гидродинамического кавитатора:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – корпус излучателя; 4 – крышка корпуса; 5 – корпус неподвижный; 6 – корпус подвижный; 7 – вал; 8 – подшипник.

Гидродинамические установки имеют недостатки:

- частая замена статора и ротора, которые изнашиваются от кавитационных воздействий;
- конструктивный зазор между ротором и статором (рис. 9).

Действительно, существенным недостатком гидродинамических установок является зазор Δ между их неподвижной и вращающейся частями. Через зазор имеет место свободный ток жидкости, что приводит к ситуации, когда кавитация не проявляется во всем объеме устройства.

Изобретения и полезные модели, основанные на использовании явления кавитации и ориентированные на применение в пожарной практике укрупненном можно разделить на те, что применяются для подогрева воды либо используемые для смешения ингредиентов или для улучшения распыления огнетушащих веществ и т. п.

Так, высокоэффективным гидродинамическим кавитационным теплогенератором конструкции А. Г. Кочурова модели ВТГ-110 мощностью 110 кВт (Патент РФ № 2277681) (рис. 10, 11) оснащен пожарно-спасательный автомобиль ПСА-С-6,0-

40(6339) [14], который выпускается ОАО «Варгашинский завод ППиСО». На месте ЧС устройство используется для отопления и горячего водоснабжения отдельных объектов (учреждения здравоохранения и т. п.). Кроме того, он применяется для подпитки горячей водой рукавных линий, а также для нагрева воды в цистерне. Аналогичное предназначение имеют роторные кавитационные аппараты А. Д. Петракова (Патенты РФ № 2142604 и № 2231004).

ОАО «Варгашинский завод противопожарного и специального оборудования» также выпустил пожарную автоцистерну АЦ СОР 2,0-20/10 (43118) «Гефест», которая предназначена для тушения пожаров при крайне низких температурах окружающей среды (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Данный автомобиль оборудован двумя кавитационными теплогенераторами ВТГ-110 (рис. 11), которые приводит в действие автономный двигатель. Подогреватель обеспечивает нагрев воды в цистерне, вместимостью 2 м^3 до температуры порядка $+60\dots 70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этого достаточно для отогрева рукавных линии в условиях крайне низких температур. К другим достоинствам автомобиля относится возможность энергети-

ческой установки обеспечивать работоспособность до четырех насосно-рукавных си-

стем других пожарных автомобилей, система удаления остатков воды из напорных рукавных линий и др.

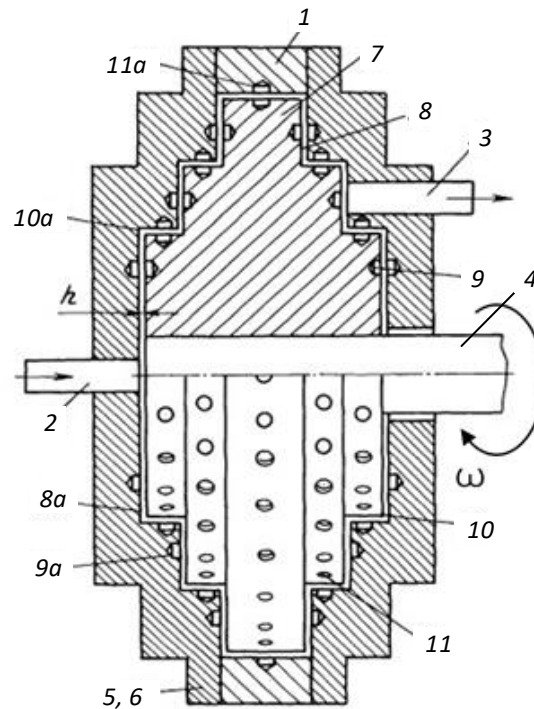


Рисунок 10. Теплопарогенератор А.Г. Кочурова (Патент РФ № 2277681):

1 – корпус; 2, 3 – патрубки входной и выходной; 4 – вал; 5, 6 – крышки; 7 – рабочий диск; 8 – площадки, 9 – выемки; 10 – торцы площадок; 11 – дополнительные выемки.

Внутренние поверхности крышек 5 и 6 повторяют форму рабочего диска 7, что предполагает наличие выемок 9а на кольцевых площадках 8а и дополнительных выемок

11а на торцах 10а. Рабочий диск 7 установлен относительно корпуса 1 и крышек 5 и 6 с зазором h .



Рисунок 11. Вихревой кавитационный теплогенератор ВТГ-110 с электроприводом

Известны патенты РФ (табл. 2), которые основаны на различных конструктивно-технических решениях, применение которых, по мнению авторов, обеспечит создание условий для реализации кавита-

ционных эффектов и, таким образом, позволит достичь увеличения ТТХ пожарных стволов: дальноточности пожарных струй или получение пен высокой кратности, или увеличение факела распыла, мелкодисперсности распыливаемой жидкости и т. п.

Таблица 2

Перечень патентов РФ, направленных на повышение ТТХ пожарных стволов

Конструкции пожарных стволов на основе патентов РФ, в которых предлагается повысить их ТТХ за счет технических решений		
тангенциального подвода жидкостей и вихреобразования	применения центробежных завихрителей	ультразвука, соударения струй, вихревых эжекторов и др.
Патент 222991 РФ опубл. 10.06.2004	Патент 2264833 РФ опубл. 02.09.2004	Патент 2074544 РФ опубл. 27.02.1997
Патент 2292958 РФ опубл. 10.02.2007	Патент 2265467 РФ опубл. 10.12.2005	Патент 2153908 РФ опубл. 10.08.2000
Патент 2416446 РФ опубл. 20.04.2011	Патент 2292958 РФ опубл. 10.02.2007	Патент 2173193 РФ опубл. 10.09.2001
Патент 2419474 РФ опубл. 27.05.2011	Патент 2372122 РФ опубл. 10.11.2009	
Патент 2429918 РФ опубл. 27.09.2011	Патент 2419474 РФ опубл. 27.05.2011	
Патент 2430760 РФ опубл. 10.10.2011		
Патент 2430761 РФ опубл. 10.10.2011		
Патент 2430789 РФ опубл. 10.10.2011		

Патент 2484866 РФ опубл. 20.06.2013		
Патент 2514742 РФ опубл. 10.05.2014		

Также известен кавитационный насадок для пожарного ствола, согласно Евразийскому патенту 018125 от 30.05.2013 г. (авторы патента И. В. Карпенчук, С. Г. Петуховский, В. В. Пармон, О. В. Черневич), содержащий корпус с присоединительной резьбой для пожарного ствола, проточный кавитирующий тракт, цилиндрическую выходную часть с набором сеток, отличающийся тем, что проточный кавитирующий тракт выполнен в виде последовательно расположенных участков различной конфигурации: 1 – участка линейного сужения, характеризующегося уг-

лом конусности 15° ; 2 – участка сферического сужения; 3 – цилиндрического участка и конически расходящегося участка 4, характеризующегося углом конусности 70° , причем длина каждого из участков пропорциональна произведению соответствующего коэффициента на диаметр выходного отверстия насадка (рис. 12).

Цель изобретения – повысить качество приготовления воздушно-механической пены посредством значительного улучшения смешения воды и пенообразователя.

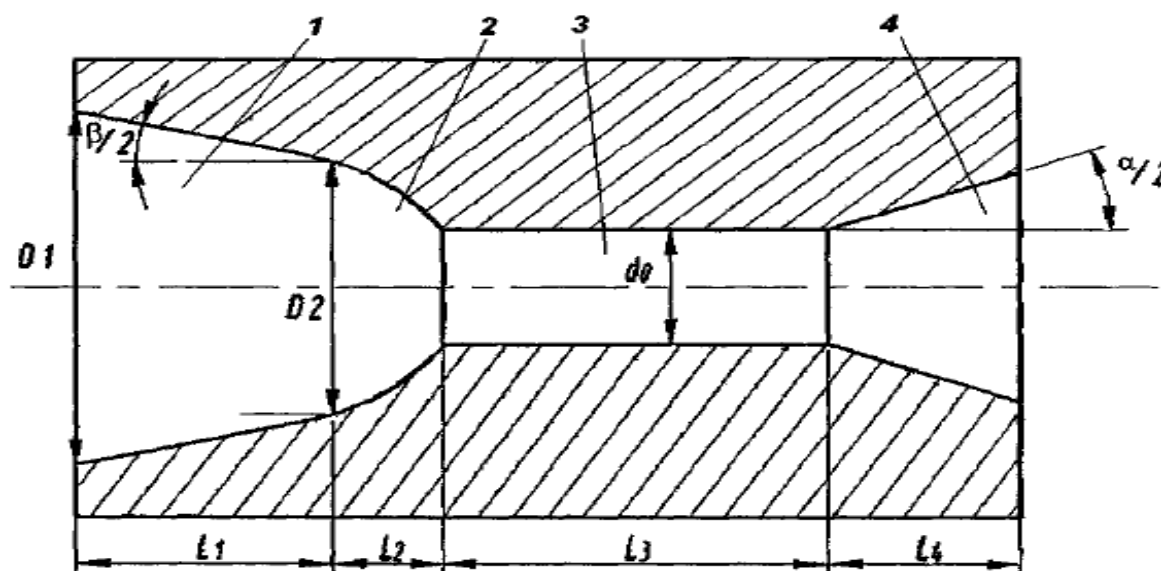


Рисунок 12. Разрез кавитационного насадка для пожарного ствола согласно Евразийскому патенту 018125

В течение последних двадцати лет теме кавитации посвящены две кандидатские диссертации, монография и несколько десятков научных статей.

Так Ю. В. Сомова в диссертации на актуальную тему [11] обосновала, разработала и исследовала эффективную, экономичную технологию обезмасливания железосодержащих шламов для обогащения на основе гидродинамической кавитации в роторно-импульсных аппаратах. Научная

новизна защищаемых в диссертации положений заключается в следующем: обосновано применение двухступенчатых роторно-импульсных аппаратов для обезмасливания шламов в условиях развитой гидродинамической кавитации. Также установлено, что подача дополнительного воздуха в зону кавитации в количестве $0,05 - \dots 0,07 \text{ м}^3/\text{м}$ интенсифицирует процесс обезмасливания шламов; эксперимен-

тально определены закономерности и параметры обезмасливания шламов в условиях гидродинамической кавитации в двухступенчатых роторно-импульсных аппаратах с содержанием нефтепродуктов до 4,0 %.

Диссертация Е. В. Бутюгиной [12] относится к фундаментальной науке. Одним из наиболее интересных эффектов, вызванных воздействием звуковой волны на жидкость, является акустическая кавитация – образование в жидкости кавитационных пузырьков. Звуковые волны в жидкости вызывают также рост, коллапс или движение таких пузырьков. Научный и практический интерес представляют изучение связанных с акустической кавитацией физических явлений, таких как сонолюминесценция (излучение пузырьком свечения во время коллапса), самоорганизация (взаимное влияние акустического поля и пузырьков), химические реакции внутри пузырька и в жидкости, самодвижение пузырька, кавитационная эрозия и многие другие. Эти явления наблюдаются в физике, химии и биологии и находят широкое практическое применение в различных областях промышленности.

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для изучения явления устойчивой акустической кавитации и связанных с ним процессов. Предложенные математические постановки и численные подходы могут быть применены также для исследования практических задач, связанных с динамикой микропузырька под действием акустического поля.

В монографии О. В. Матвиенко, Ф. Г. Унгера, В. П. Бадужева [13] рассмотрены структуры битумов и битумных дисперсных систем, пути улучшения их свойств для создания более качественных

битумных вяжущих для применения их в дорожном строительстве в различных климатических условиях. Научная новизна исследования заключается в разработке математических моделей течения закрученных потоков битумных вяжущих в трубах и каналах, возникновения кавитации, а также математических моделей модифицирования битумов и получения битумных эмульсий в кавитационно-смесительном диспергаторе. Особое внимание уделено практическому применению указанных математических моделей при создании различных кавитационно-смесительных устройств для приготовления битумных дисперсных систем.

В работе [15] рассмотрены пути повышения эффективности и надежности систем противопожарной защиты резервуаров нефти и нефтепродуктов. Установлено, что перспективным методом повышения эффективности пеногенераторов проточного типа является возбуждение гидродинамической кавитации в потоке движущейся жидкости. Приведены результаты исследований по разработке эффективных пеногенераторов пены низкой кратности, работающих в кавитационном режиме при высоких противодавлениях.

С целью теоретического исследования тока жидкого огнетушащего вещества в пеногенераторе в условиях развитой гидродинамической кавитации авторами была разработана математическая модель движения газожидкостной смеси в его диффузоре. Затем на ее основе рассчитана конструкция их опытных образцов. Пеногенератор имеет камеру для подачи воздуха в раствор пенообразователя и кавитационную струйную камеру для получения высококачественной пены низкой кратности (рис. 13).

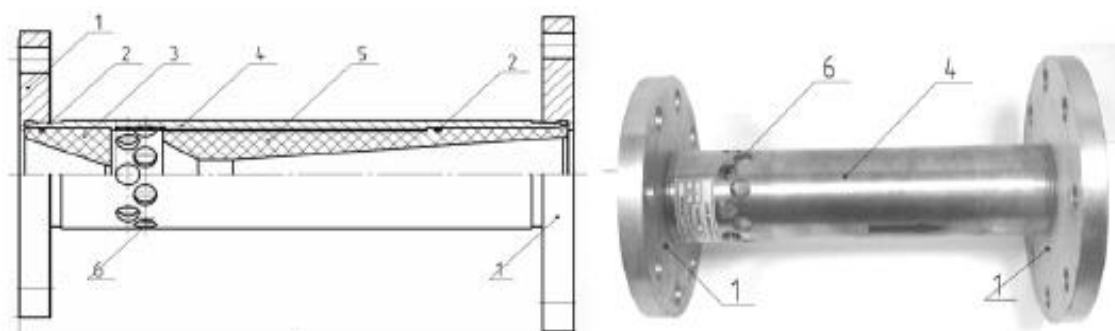


Рисунок 13. Принципиальная схема и общий вид пеногенератора:
 1 – фланец; 2 – прокладка; 3 – конфузор; 4 – корпус; 5 – диффузор;
 6 – отверстие для эжекции воздуха

Точность разработанной математической модели была проверена в ходе экспериментальных исследований моделей пеногенераторов.

Проведены натурные испытания по определению огнетушащей эффективности опытных образцов пеногенераторов.

Кроме того, разработана математическая модель и методика, что позволяет проектировать финишный отрезок системы подслоного пожаротушения с гидросопротивлением, обеспечивающим работу пеногенератора в режиме кавитации.

Посредством скоростной киносъемки было выявлено, что интенсивное генерирование воздушно-механической пены на выходе из аппарата обеспечивается процессом конденсации каверн по всему объему кавитационной зоны, заполняющей пространство его диффузора.

Следовательно, по критериям минимизации гидросопротивления и появления кавитации рассчитаны, разработаны, изготовлены и апробированы в реальных условиях эксплуатации конструктивно-технические решения высокоэффективного кавитационного пеногенератора, обеспечивающие следующие ТТХ: подача пенообразующего раствора – 10, 20 и 30 л/с; напор на входе порядка $(0,9 \pm 0,1)$ МПа; кратность воздушно-механической пены – не менее 4.

Из вышеизложенного можно заключить, что систематическими научными исследованиями кавитации в пожарной сфере России никто не занимается.

В настоящее время основными жидкостными огнетушащими веществами является вода и водные растворы:

- растворы пенообразователя,
- растворы солей относятся к числу жидких огнетушащих средств. Так, применяются растворы бикарбоната натрия, хлоридов кальция и аммония, глауберовой соли, аммиачно-фосфорных солей и др.

Соли, выпадая из водного раствора, образуют на поверхности горящего вещества изолирующие пленки, отнимающие теплоту. При разложении солей выделяются негорючие газы [16].

Кавитационная обработка водных растворов огнетушащих веществ позволит значительно ускорить процесс приготовления раствора, придать ему новые физические, химические и огнетушащие свойства.

Водные эмульсии и суспензии в пожаротушении практически не применяются ввиду сложности их приготовления.

Эмульсия – это дисперсная система, т.е. смесь из некоторого количества фаз (тел), не способных смешиваться, раствориться в друг друга или взаимодействовать на уровне химических процессов, а потому сохраняющихся в виде мельчайших капель. Эмульсии относятся обычно к грубодисперсным системам, поскольку капельки дисперсной фазы имеют размеры от 1 до 50 мкм.

Так, известен огнетушитель воздушно-эмульсионный закачной марки ОВЭ-2(з)-АВЕ, но в нем готовая эмульсия

огнетушащего средства ФЭМ находится под давлением в баллоне.

Суспензия — смесь жидкости и твердых частиц, равномерно распределенных в жидкости.

При приготовлении в заводских условиях суспензий и эмульсий находят применение следующие способы: смешение, размалывание в жидкой среде, раздробление с помощью ультразвука, применение кавитационных технологий.

Технологии смешения, размалывания в жидкой среде, дробления с помощью ультразвука требуют сложного оборудования и энергозатратны.

В настоящее время в промышленных масштабах при производстве эмульсий и суспензий широко применяются кавитационные технологии.

С применением кавитации имеется реальная возможность получать водные эмульсии низкокипящих жидкостей (галогидоуглеводородов, озонобезопасных хладонов, порофоров, вязких жидкостей [16] и др.).

Посредством кавитационных технологий можно также получать суспензии минеральных крошек, огнезащитных покрытий, пылей резиновой крошки и других твердых материалов.

В экстремальнонизких температурных условиях бесперебойная подача огнетушащей жидкости (воды или пенообразующего раствора) к месту работы пожарно-спасательных подразделений сопряжена со значительными трудностями. Во-первых, в связи со снижением температуры в водопроводе до 0,5...1 °С, а в открытых водоемах, реках и озерах до 0,3 °С, во-вторых, опасностью замерзания воды в рукавных линиях, особенно в начальный период работы насосно-рукавной системы. При низкой наружной температуре температура стенок рукавов близка к температуре окружающего воздуха и поступающая в них вода быстро охлаждается, превращаясь иногда в пастообразную ледяную массу («шугу»), которая закупоривает сначала

стволы и разветвления, а затем и рукавную линию в целом.

В результате реально возможен срыв выполнения боевой задачи. Замерзшие рукавные линии сложно разобрать, и, соответственно, убрать в скатки. Попытки загибов замерзших рукавов в ходе сворачивания сил и средств после окончания тушения пожара приводят к их механическим повреждениям (порывам).

При нагреве воды, подаваемой по пожарным рукавам в условиях низких температур, повышается надежность пожарных насосно-рукавных систем, появляется объективная возможность увеличить длины магистральных рукавных линий без перемерзания [17].

Зимой для нагрева воды в пожарных насосно-рукавных системах неплохо зарекомендовали себя вихревые кавитационные теплопарогенераторы ВТГ-110, также применяются другие гидродинамические кавитационные аппараты.

Таким образом, кавитация относится к физическим явлениям, промышленное использование которых в настоящее время активно развивается, не будучи до конца исследованным. Познание данного явления продолжает оставаться на стадии феноменологии и эмпиризма.

В настоящее время известны технические решения на уровне патентов РФ для применения кавитации в практике пожарной охраны. Также проводятся аналитические и экспериментальные исследования кавитации в самых различных сферах, кроме пожарной охраны.

Из анализа публикаций сделан вывод о том, что изучением явления кавитации применительно к пожарно-спасательной технике в РФ практически никто не занимается. Намечены направления исследований и разработок новых и модернизации уже существующих узлов, оборудования и технологий за счет применения данного явления для решения актуальных задач противопожарной службы.

Пожарная охрана будет более технологичной, если в ее арсенал поступят образцы конструктивно-технических решений, разработанные и изготовленные на базе результатов эмпирического определения наиболее эффективных и экономичных конструкций пожарного оборудования следующих поколений.

Исследование и последующее внедрение кавитационных технологий в пожарную практику позволит с минимальными

энергозатратами осуществлять подогрев воды перед подачей в рукавные линии в низкотемпературных условиях, обрабатывать огнетушащие средства с целью повышения их эффективности и экономичности, получать новые огнетушащие средства в виде эмульсий и суспензий, составы для огнезащитных покрытий, решать иные задачи.

Литература

1. Указ Президента РФ от 5.03.2020 № 164 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года».
2. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М., 1974. 348 с.
3. Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч. 1. Киев, 1997. 940 с.
4. Лукашевич О. Д., Патрушев Е. И. Новые подходы к разработке технологии очистки и обеззараживания воды с применением озонирования и кавитации // Известия вузов. Строительство. 2004. № 8. С. 84–90.
5. Гогиш Л. В., Степанов Г. Ю. Отрывные и кавитационные течения. Основные свойства и расчетные модели. М., 1990. 382 с.
6. Кислов Е. А. и др. Кавитационная модель образования эмульсии в струйном аппарате // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2004. Т. 47. № 6. С. 125–127.
7. Шестаков С. Д. и др. Технология и оборудование для обработки пищевых сред с использованием кавитационной дезинтеграции. СПб., 2013. 152 с.
8. Смородов Е. А., Галияхметов Р. Н., Ильгамов М. А. Физика и химия кавитации. М., 2008. 208 с.
9. Макналти П., Пирсол И. Возникновение кавитации в насосах // Теоретические основы инженерных расчетов. 1982. № 1. С. 154–161.
10. Иваницкий Г. К., Надбайло А. Е. Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов // Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34. № 2. С. 40–47.
11. Сомова Ю. В. Разработка технологии обезмасливания железосодержащих шламов для обогащения на основе гидродинамической кавитации в роторно-импульсных аппаратах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013. 21 с.
12. Бутюгина Е. В. Динамика газовых пузырьков переменной массы в жидкости под действием акустического поля: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2015. 19 с.
13. Матвиенко О. В., Унгер Ф. Г., Бадиев В. П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск, 2015. 336 с.
14. Пожарно-спасательный автомобиль исполнения ХЛ (ПСА-С) ПСА-С 6,0-40/100(6339) Модель 40ВР. Руководство по эксплуатации 40ВР-00-00-00РЭ. Варгаши, 2011. 40 с.
15. Пармон В. В., Карпенчук И. В., Камлюк А. Н. Кавитация в генераторах пены низкой кратности для подслоного тушения пожаров в резервуарах нефти и нефтепродуктов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2011. № 1 (13). С. 94–104.
16. Марков В. Ф. и др. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Екатеринбург, 2009. 274 с.
17. Алешков М. В. Повышение работоспособности напорных рукавных линий при тушении пожаров в условиях низких температур: дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 293 с.

References

1. Ukaz Prezidenta RF ot 5.03.2020 № 164 «Ob Osnovah gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2035 goda».
2. Knepp R., Dejli Dzh., Hemmit F. Kavitaciya. M., 1974. 348 s.
3. Fedotkin I. M., Gulyj I. S. Kavitaciya, kavitacionnaya tekhnika i tekhnologiya, ih ispol'zovanie v promyshlennosti (teoriya, raschety i konstrukcii kavitacionnyh apparatov). CH. 1. Kiev, 1997. 940 s.
4. Lukashevich O. D., Patrushev E. I. Novye podhody k razrabotke tekhnologii ochistki i obezzarazhivaniya vody s primeneniem ozonirovaniya i kavitacii // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2004. № 8. S. 84–90.

5. Gogish L. V., Stepanov G. YU. Otryvnye i kavitacionnye techeniya. Osnovnye svoystva i raschetnye modeli. M., 1990. 382 s.
6. Kislov E. A. i dr. Kavitacionnaya model' obrazovaniya emul'sii v strujnom apparate // Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2004. T. 47. № 6. S. 125–127.
7. Shestakov S. D. i dr. Tekhnologiya i oborudovanie dlya obrabotki pishchevyh sred s ispol'zovaniem kavitacionnoj dezintegracii. SPb., 2013. 152 s.
8. Smorodov E. A., Galiyev R. N., Il'gamov M. A. Fizika i himiya kavitacii. M., 2008. 208 s.
9. Maknalti P., Pirsol I. Vozniknovenie kavitacii v nasosah // Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1982. № 1. S. 154–161.
10. Ivanickij G. K., Nadbajlo A. E. Analiticheskoe issledovanie kavitacii v rabochem kolese centrebeznyh nasosov // Promyshlennaya teplotekhnika. 2012. T. 34. № 2. S. 40–47.
11. Somova YU. V. Razrabotka tekhnologii obezmaslivaniya zhelezosoderzhashchih shlamov dlya obogashcheniya na osnove gidrodinamicheskoy kavitacii v rotorno-impul'snyh apparatah: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2013. 21 s.
12. Butyugina E. V. Dinamika gazovyh puzyr'kov peremennoj massy v zhidkosti pod dejstviem akusticheskogo polya: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Ufa, 2015. 19 s.
13. Matvienko O. V., Unger F. G., Baduev V. P. Matematicheskie modeli proizvodstvennyh processov dlya prigotovleniya bitumnyh dispersnyh sistem. Tomsk, 2015. 336 s.
14. Pozharno-spatatel'nyj avtomobil' ispolneniya HL (PSA-S) PSA-S 6,0-40/100(6339) Model' 40VR. Rukovodstvo po ekspluatatsii 40VR-00-00-00RE. Vargashi, 2011. 40 s.
15. Parmon V. V., Karpenchuk I. V., Kamlyuk A. N. Kavitaciya v generatorah peny nizkoj kratnosti dlya pod-slojnogo tusheniya pozharov v rezervuarah nefi i nefteproduktov // Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MCHS Respubliki Belarus'. 2011. № 1 (13). S. 94–104.
16. Markov V. F. i dr. Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov. Ekaterinburg, 2009. 274 s.
17. Aleshkov M. V. Povyshenie rabotosposobnosti napornyh rukavnyh linij pri tushenii pozharov v usloviyah nizkih temperatur: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1990. 293 s.