

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

С.И. Минин

*Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ
249040, Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д. 1*

Р

Рассмотрен метод ультразвуковой очистки поверхностей теплообменного оборудования. Представлена схема механизма ультразвуковой очистки. Если к поверхности теплообменного оборудования, заполненного теплоносителем, подвести ультразвук, то под действием ударной волны, возникающей при захлопывании кавитационных воздушных пузырьков, поверхность очистится от накипи. Кроме того, в жидкости возникает много пузырьков, не связанных с кавитационными явлениями. Эти пузырьки проникают в поры, щели и зазоры между накипью и поверхностью теплообменного оборудования. Под действием ультразвуковых колебаний пузырьки интенсивно колеблются, вызывая разрушение верхнего слоя накипи. Ультразвуковая кавитация в жидкости зависит от ее плотности, вязкости, температуры, молекулярного веса, сжимаемости, содержания газов, наличия инородных микроскопических включений, частоты и интенсивности ультразвуковых колебаний, статического давления и др. Показано, что целенаправленным изменением некоторых из этих факторов можно влиять на активность кавитационного процесса в нужном направлении. Качество и скорость очистки определяются акустической мощностью и частотой колебаний, температурой и составом рабочего раствора. Высокая частота колебаний ускоряет химические и физические процессы, происходящие в жидкости. Для этих целей могут быть применены генераторы типа УЗГ с магнитофрикционными преобразователями типа ПМС. Ультразвуковой преобразователь преобразует подаваемые на него электрические колебания в механические такой же частоты. В большинстве установок используются частоты от 18 до 44 кГц с интенсивностью колебаний от 0,5 до 10 Вт/см². Верхняя граница частотного диапазона обусловлена механизмом образования и разрушения кавитационных пузырьков: при очень большой частоте пузырьки не успевают захлопываться, что снижает микроударное действие кавитации. Ввиду того, что силы, действующие на частицы загрязнений, более или менее равномерно распределены по всему объему моющего раствора, достигается очистка самых незначительных пор. Качество ультразвуковой очистки несравнимо с другими способами. Особое преимущество ультразвуковой очистки заключается в ее высокой производительности при малой затрате физического труда, технологичности, относительной простоте оборудования, возможности замены огнеопасных и дорогостоящих органических растворителей безопасными и дешевыми водными растворами щелочных солей.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, акустические потоки, теплообменное оборудование, качество очистки поверхности, технологичность.

ВВЕДЕНИЕ

Основными преимуществами ультразвуковой очистки можно считать ее высокое качество, технологичность и относительную простоту оборудования.

Качество очистки поверхностей теплообменного оборудования от накипи во многом предопределяет теплопередачу, а также срок службы оборудования. Механическая ручная очистка даже с применением различных растворов, как правило, не отвечает требованиям современного промышленного производства. Если же теплообменное оборудование имеет сложную форму с труднодоступными отверстиями и полостями, то вручную их хорошо очистить практически невозможно. Использование ультразвука позволяет механизировать процессы очистки. При этом ультразвуковой метод обеспечивает высокое качество и стабильность очистки. Внедрение ультразвукового технологического теплообменного оборудования позволяет экономить огромные средства.

Качество ультразвуковой очистки несравнимо с другими способами. Например, при прополаскивании деталей на их поверхности остается до 80% загрязнений, при вибрационной очистке – около 55%, при ручной – около 20%, а при ультразвуковой – не более 0,5%. Особое преимущество ультразвуковой очистки заключается в ее высокой производительности при малой затрате физического труда, технологичности, относительной простоте оборудования, возможности замены огнеопасных и дорогостоящих органических растворителей безопасными и дешевыми водными растворами щелочных солей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ультразвуковая очистка – сложный физико-химический процесс, включающий в себя развитие кавитации и акустических потоков в очищаемой жидкости, действие которых приводит к разрушению загрязнений и способствует эмульгированию примесей.

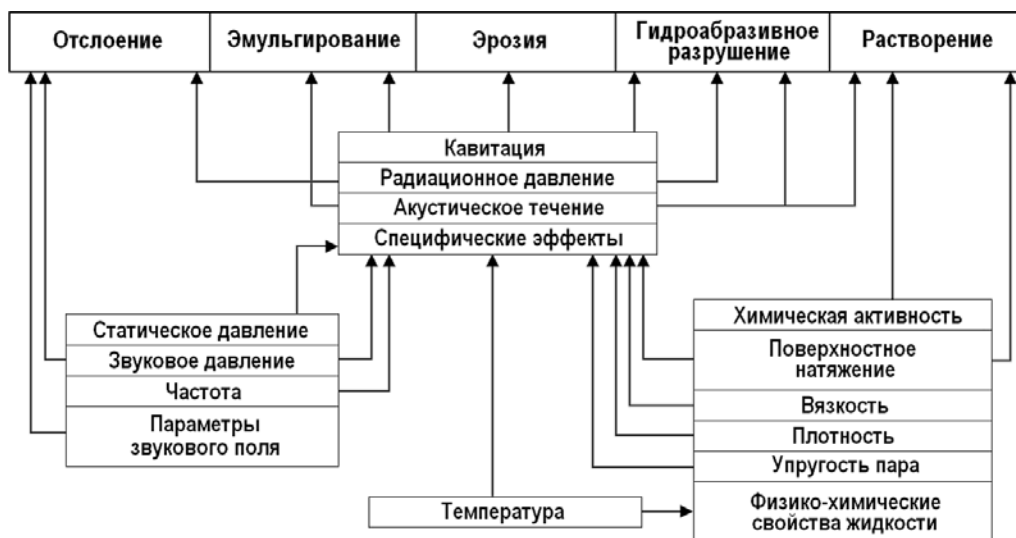


Рис. 1. Схема механизма ультразвуковой очистки

Условно определено пять разновидностей разрушений: отслоение, эмульгирование, эрозия, гидроабразивное разрушение и растворение. Разрушение, отделение и растворение пленки загрязнений при ультразвуковой очистке происходят в результате совместного действия химически активной среды и факторов, возникающих в жидкости под влиянием приложенного акустического поля. Любая точка в жидкости при воздействии ультразвука попеременно подвергается сжатию, а затем разрежению. В точке сжатия давление в среде является положительным, в точке разрежения – отрицательным. Стрелки на схеме (рис. 1) показывают [1] каким образом действует каждый из факторов на

процесс разрушения пленок загрязнении. Одни факторы действуют на процесс очистки непосредственно, другие – через специфические ультразвуковые эффекты.

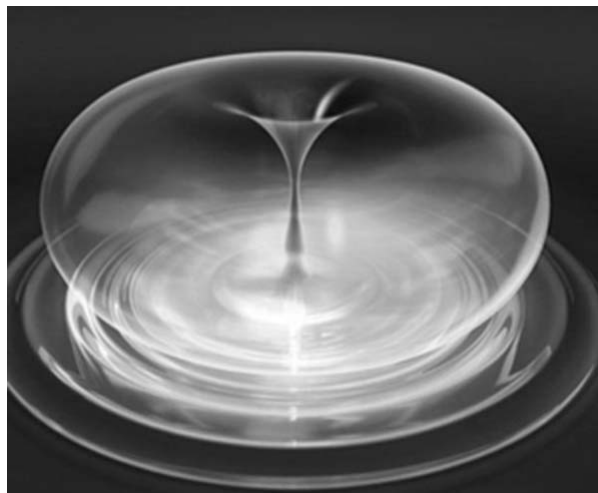


Рис. 2. Кавитационный пузырек

В реальной жидкости всегда имеются определенные местные нарушения однородности, которые могут служить зародышами кавитации. При достаточно высокой амплитуде при переходе из зоны положительного в зону отрицательного давления возникает явление кавитации – «взрыв» вакуумных кавитационных пузырьков (рис. 2) микронного размера в большом количестве, вызывающий ударную волну, скорость которой достигает 400 км/ч. Газовые кавитационные пузырьки могут возникать в результате химических реакций либо искусственно вводиться в моющий раствор [2 – 5]. Условия равновесия газового пузырька определяются соотношением

$$p_r = p_{ст} + 2\sigma/R_0,$$

где p_r – давление газа в пузырьке; $p_{ст}$ – гидростатическое давление; σ – поверхностное натяжение жидкость-пар; R_0 – начальный радиус пузырька.

Наличие в качестве зародышей газовых пузырьков приводит к возникновению кавитации даже при сравнительно небольшой интенсивности вводимых в жидкость колебаний [6 – 9]. Так, в случае наличия в жидкости парогазовых пузырьков с начальным радиусом R_0 пороговое давление возникновения кавитации p_R имеет вид

$$p_R = p_0 - p_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{(2\sigma L / R_0)^3}{p_0 - p_r - 2\sigma L / R_0}},$$

где p_v – давление насыщенных паров жидкости.

Развитие кавитации в жидкости сопровождается возникновением большого числа парогазовых навигационных пузырьков. Кавитационные пузырьки, возникающие в ультразвуковом поле, различны по размерам, их диаметры колеблются от 0,01 до 1,0 мм. Этим размерам соответствуют собственные резонансные частоты пузырьков 600 – 6 кГц. Для заданных переменного давления и частоты звука существуют минимальный и максимальный радиусы пузырьков, способных кавитировать. Максимальный резонансный радиус R_p пузырьков может быть найден из выражения [7]

$$f = [0,5/(\pi R_p)]((3k/\rho)(p_{ст} + 2\sigma/R_p))^{1/2},$$

где f – резонансная частота пузырька радиуса R_p ; ρ – плотность жидкости; σ – поверхностное натяжение.

По этой формуле можно оценить частотную зависимость кавитационной прочности воды. По мере увеличения частоты кавитировать могут лишь те пузырьки, резонансные частоты которых лежат выше указанной частоты, т. е. пузырьки все меньшего и меньшего радиуса. Порог кавитационной прочности с ростом частоты повышается.

В кавитационном пузырьке непосредственно перед взрывом накапливается огромное количество энергии. Благодаря сочетанию давления (до 700 атмосфер), температуры (около 5000 °С) и скорости ударной волны происходит освобождение поверхности от накипи. Особенности развития ультразвуковой кавитации в жидкости зависят от ее плотности, вязкости, температуры, молекулярного веса, сжимаемости, содержания газов, наличия инородных микроскопических включений, частоты и интенсивности ультразвуковых колебаний, статического давления и др. Целенаправленным изменением некоторых из этих факторов можно влиять на активность кавитационного процесса в нужном направлении. В воде кавитация развивается более интенсивно, чем в органических растворителях. Наличие газа в жидкости повышает эффективность кавитационных явлений. С увеличением температуры жидкости интенсивность кавитации растет до определенного максимума, пройдя который, начинает уменьшаться. Эффективность действия кавитации находится в прямой зависимости от интенсивности ультразвуковых колебаний при ее увеличении до определенного уровня и в обратной зависимости от их частоты. Большое значение в интенсификации процесса ультразвуковой кавитации имеет подбор определенных соотношений между интенсивностью ультразвуковых колебаний и избыточным статическим давлением в жидкости.

Уровень кавитационной эрозии в жидкости можно многократно повышать, подбирая определенные соотношения между звуковым и статическим давлениями.

При повышении гидростатического давления до 0,5 МПа, а затем до 1,0 МПа область кавитации уменьшается в объеме и сохраняется лишь над центром излучателя, где уровень звукового давления максимальный. При этом полностью исчезают пульсирующие пузырьки, увеличивается эрозионная активность жидкости и резко возрастает скорость акустических течений. Повышение статического давления обеспечивает более равномерное распределение областей кавитации в объеме жидкости [9].

Разработанный метод позволяет повысить интенсивность развития ультразвуковой кавитации и обеспечивает значительное ускорение кавитационного разрушения твердых тел и поверхностей пленок в любых жидкостях. Повышение эрозионной активности жидкости происходит без увеличения затрат потребляемой энергии.

При движении маленьких пузырьков между ними действуют силы притяжения. Притягиваясь, мелкие пузырьки сливаются, образуя пузырьки больших размеров, которые в свою очередь притягивают следующие, более мелкие пузырьки, в результате чего происходит их непрерывный рост. Эти явления объясняются действием переменного давления, возникающего в воде под действием ультразвуковых колебаний.

При сокращении (смыкании) пузырька из его центра распространяется сферическая ударная волна, а максимальное давление, возникающее в жидкости на расстоянии радиуса от центра пузырька, равно

$$p = p_0 R_0^3 r^{-3},$$

где r – радиус пузырька в рассматриваемый момент времени.

Радиальную скорость сокращения пузырька можно определить из выражения

$$v = ((1,5p_0/\rho)[(R_0/r)^3 - 1])^{1/2}.$$

Полное смыкание пузырька при гидростатическом давлении p_0 происходит за время

$$t = 0,915r_0(\rho/p_0)^{1/2},$$

откуда видно, что для смыкания кавитационных пузырьков необходимо вполне опреде-

ленное время. Например, при нормальном давлении время смыкания газового пузырька радиусом 0,05 мм в воде равно 5 мкс [7 – 9].

Давление в ударной волне, от которого непосредственно зависит интенсивность эрозии, в момент сжатия пропорционально максимальному давлению

$$p_{\max} = p_0 \sigma / Z^4 = p_n / Z^4,$$

где $p_n = p_d + p_v$ – давление внутри пузырька при его максимальном радиусе; p_d, p_v – парциальные давления соответственно насыщенного пара и воздуха; $\sigma = p_d / p_v$ – параметр, характеризующий содержание воздуха в полости; $Z = R_{\min} / R_{\max}$ – безразмерный минимальный радиус пузырька. Таким образом, при данном гидростатическом давлении p_0 максимальное давление p_{\max} и, следовательно, эрозия будут зависеть от величин p_d, p_v и Z .

При повышении температуры жидкости снижается порог кавитации, что приводит к увеличению числа кавитационных пузырьков и интенсификации процесса очистки. Вместе с тем, в связи с уменьшением содержания воздуха в пузырьках повышается их сжимаемость, что приводит к повышению интенсивности ударных волн и увеличению эрозии. При дальнейшем повышении температуры воздухосодержание увеличивается вследствие значительного давления насыщенных паров, давление внутри пузырька при максимальном радиусе увеличивается [10 – 14].

При воздействии ультразвука на жидкость происходит ее дегазация, которая увеличивает степень кавитационной эрозии (в кавитационные пузырьки поступает меньшее количество воздуха), сжимаемость пузырьков увеличивается, и давление в ударной волне возрастает [15].

Важным фактором в повышении интенсивности ультразвуковой кавитации является выбор рабочей частоты ультразвуковых колебаний. Эффективный диапазон частот колебаний находится в пределах 18 – 44 кГц. Значительное повышение частоты ультразвуковых колебаний нежелательно, так как при большой частоте кавитационный пузырек не успевает вырасти до необходимых размеров и его «энергетические» возможности при захлопывании значительно снижаются. Кроме того, при большой частоте в пузырьке остается парогазовая смесь, препятствующая быстрому захлопыванию кавитационных пузырьков. Уменьшать частоту тоже невыгодно. Во-первых, получает развитие процесс диффузии парогазовой смеси в кавитационный пузырек; во-вторых, радиус кавитационного пузырька возрастает настолько, что при его захлопывании снижается эффективность кавитации [16 – 19].

Увеличение амплитуды колебательных смещений источника звука приводит к изменению характера ряда акустических процессов в жидкости. Рост амплитуды колебаний до 10 – 15 мкм сопровождается существенным увеличением удельной излучаемой акустической мощности до 15 – 20 Вт/см². В этих условиях уменьшается акустическое сопротивление нагрузки, приводящее к изменению условий передачи акустической энергии в жидкость, изменяется топография кавитационных эффектов, формируются акустические потоки со значительными скоростями. К основным изменяющимся параметрам можно отнести активную акустическую мощность, излучаемую в жидкость, механическое сопротивление нагрузки, кавитационно-эрозионные свойства технологической среды, скорость и характер акустических потоков [20]. Механическое сопротивление нагрузки R_n характеризует реакцию среды на режим работы колебательной системы или излучаемую в нагрузку акустическую мощность. Сопротивление нагрузки связано с ее физическими свойствами – с плотностью ρ и скоростью распространения звука C . В режимах высокоамплитудной очистки, т.е. в режимах развитой кавитации, технологическая среда представляет собой двухфазную систему, состоящую из пузырьков, заполненных парами жидкости и собственно жидкостью. Реальное механическое сопротив-

ление нагрузки при увеличении амплитуды колебательной скорости определяется путем расчета после экспериментального определения активной акустической мощности, излучаемой в жидкость, $R_n = 2W_a/V^2$, где V – объем кавитационной емкости.

При достижении амплитуды колебаний излучателя в жидкости 8 – 12 мкм формируется мощный поток пузырьков кавитационного происхождения (акустический поток). Скорость потока пузырьков в средней зоне достигает 0,2 – 0,4 м/с. По мере удаления от источника колебаний размеры пузырьков увеличиваются, и скорость их замедляется. Вблизи излучающей поверхности источника звука возникают микротечения жидкости со скоростью примерно 100 м/с.

Очистка происходит при существенном понижении механического сопротивления нагрузки и сопровождается изменением уровня эрозионной способности жидкости. Одновременно наблюдается резкое увеличение скорости микротечений и пульсаций отдельных пузырьков жидкости. Характерные режимы высокоамплитудной очистки начинаются при амплитудах колебаний в жидкости $\xi_m = 10 - 12$ мкм, когда наблюдается скачкообразное или экстремальное изменение всех указанных характеристик.

Для реализации этих акустических режимов необходимы специальные высокоамплитудные колебательные системы. Ультразвуковая кавитация и взрывы микропузырьков эффективно вытесняют насыщенный слой, позволяя свежей порции химического реагента соприкоснуться с загрязнителем. Это особенно полезно, когда необходимо очистить неровные поверхности или внутренние полости (рис. 3). Эффективность и качество ультразвуковой очистки во многом зависят от химических свойств очистительных жидкостей.

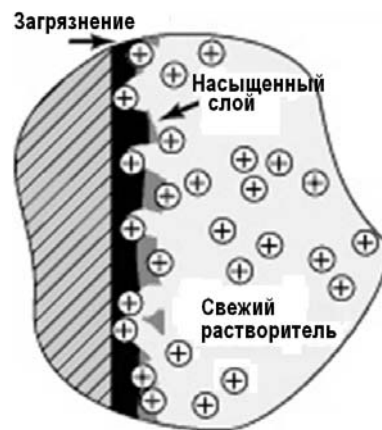


Рис. 3. Ультразвуковая очистка с применением химического реагента

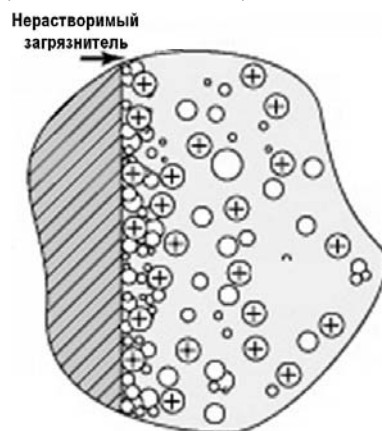


Рис. 4. Удаление ультразвуком нерастворимых частиц

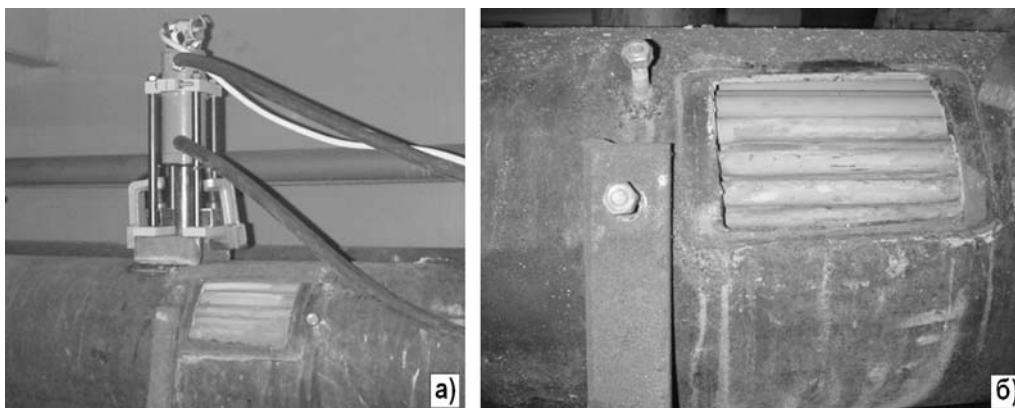


Рис. 5. Трубы теплообменника до ультразвуковой очистки (а) и после нее (б)

Некоторые типы загрязнений состоят из нерастворимых частиц, удерживающихся на поверхности с помощью ионных сил. Для удаления этих частиц достаточно их смещения, чтобы разорвать силы притяжения с поверхностью. Этому способствуют кавитационные пузырьки (рис. 4). Эффект ультразвука создает механическое микроперемешивание, которое эффективнее удаляет растворимые и нерастворимые загрязнители.

Тип раствора, используемого в ультразвуковой очистке, является очень важным фактором. Растворители, такие как 1,1,1-трихлорэтан и фреон, эффективно использовались в течение многих лет, но с появлением Монреальского протокола, регламентирующего устранение основных озоноразрушающих веществ к 1996 г., химические компании разработали новые продукты, отвечающие требованиям операций по ультразвуковой очистке и совместимые со здоровьем и благополучием общества. Лучше всего использовать моющие средства на водной основе. Вода является отличным растворителем, нетоксична, не воспламеняется и безопасна для окружающей среды. Утилизировать отработанную воду с загрязнениями уже гораздо труднее. Обработка деталей сложной формы чистой водой может быть осложнена. В растворах без моющих средств существует высокое поверхностное натяжение, что делает затруднительной очистку в труднодоступных местах.

Водопроводная вода, обладающая высокой кавитационной способностью, может применяться как моющая среда. Однако она применима только в менее ответственных технологических процессах или тогда, когда процесс очистки предусматривает нейтрализацию ее отрицательного воздействия на очищаемые поверхности. Более эффективны водные растворы щелочей с добавлением различных поверхностно-активных веществ.

Эффективность кавитационной эрозии зависит от температуры жидкости, в которой производится очистка. При повышении температуры увеличивается давление паров и газов в кавитационных пузырьках и уменьшается сила ударов при их захлопывании. При этом растворимость газов в жидкости понижается и увеличивается число зарождающихся кавитационных пузырьков и соответственно число их схлопываний в единицу времени. Эти противоположно действующие факторы (повышение температуры и эффективность кавитационной эрозии) и обуславливают оптимальный температурный интервал воздействия кавитации на очистку.

Для каждой среды существует температура, при которой эрозия достигает максимума. При низких температурах загрязнения растворяются хуже. Наиболее благоприятной для эффективного растворения загрязнений и воздействия ультразвуковой кавитации является температура рабочей жидкости 20 – 25°C.

Продолжительность ультразвуковой очистки колеблется от минут до нескольких часов и зависит от вида и количества загрязнений на единицу площади очищаемой поверхности. Внешний вид труб теплообменного аппарата до и после ультразвуковой

очистки, произведенной в течение 30-ти минут, представлен на рис. 5.

Размеры и электрическая мощность ультразвуковых установок зависят от размеров обрабатываемых теплообменных аппаратов и степени их загрязненности.

Конструктивно ультразвуковые установки могут иметь различное исполнение, но основной принцип их действия одинаков. Для каждой ультразвуковой очистительной установки необходим прежде всего ультразвуковой высокочастотный генератор. Ультразвуковой генератор соединен электрическими линиями связи с магнитострикционным преобразователем, изготовленным из никеля и феррита. Могут применяться пьезоэлектрические преобразователи, изготовленные из керамики. Для охлаждения магнитострикционных преобразователей используется система охлаждения, которая может быть замкнутой или проточной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ультразвуковой очистки поверхностей теплообменного оборудования АЭС позволяет повысить их теплопередачу при малой затрате физического труда и денежных средств. Ультразвуковые устройства, применяемые при очистке, технологичны и относительно просты.

Литература

1. *Агранат Б.А.* Ультразвуковая технология. – М.: Машиностроение, 1984. – 503 с.
2. *Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И.* Ультразвуковая очистка. – М.: Наука, 1970. – 260 с.
3. *Розенберг Л.Д.* Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1990. – 686 с.
5. *Бронин Ф.А.* Установки серии УЗВФ. – М.: Наука, 1998. – 47 с.
6. *Донской А.В.* Ультразвуковые электротехнические установки. – М.: Энергия, 1978. – 275 с.
7. *Келлер О.К., Кратых Г.С., Любляницкий Г.Д.* Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977. – 243 с.
8. *Бергман Л.И.* Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Издательство иностранной литературы, 1967. – 113 с.
9. *Голямина И.П.* Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – С. 242-247.
10. *Медведев А.М.* Ультразвуковая очистка электронных модулей. Компоненты и технологии. – М.: Наука, 2001. – №15. – С. 20-24.
11. *Бурякова Н.Е.* Стирка ультразвуком – миф или реальность? // Потребитель. – 2005. – №11. – С. 11-18.
12. *Розенберг Л.Д., Сиротюк М.Г.* Об излучении звука при наличии кавитации. // Акустический журнал. – 1960. – Т. 6. – № 4. – С. 478-486.
13. *Розенберг Л.Д.* Кавитационная область. Мощные ультразвуковые поля. Физика и техника мощного ультразвука. – М.: Наука, 1968. – С. 221-266.
14. *Шестаков С.Д.* Математическая модель гидродинамической кавитации. / Труды XVI Сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 71-73.
15. *Кнэпп Р., Дейли Дж. и Хэммит Ф.* Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 236 с.
16. *Шмарц В. Л.* Ультразвуковая очистка деталей. // Применение ультразвука в технологии машиностроения. – 1960. – Вып. 1. – С. 201.
17. *Рыкова Н. С.* Ультразвуковая очистка деталей. // Применение ультразвука в технологии машиностроения. – 1961. – Вып. 2. – С. 111-112.
18. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – С. 243.
19. *Николаевский Н.Н.* Ультразвуковой метод предотвращения накипеобразования. // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 10. – С. 44-45.

20. Ultrasonic Metal Spot Welder Frontier . KORMAX SYSTEM. Электронный ресурс:
<http://www.kormax.co.kr/> (дата доступа 10.04.2017).

Поступила в редакцию 05.05.2017г.

Автор

Минин Сергей Иванович, доцент, кандидат техн. наук
E-mail: akid@inbox.ru

UDC 534.6.08

**ULTRASONIC CLEANING OF HEAT EXCHANGING
NUCLEAR POWER PLANT EQUIPMENT**

Minin S.I.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»
1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

The method for ultrasonic cleaning of surfaces of heat-exchange equipment is examined. Schematic description of the ultrasonic cleaning mechanism is presented. When ultrasound is applied to the surface of heat exchange equipment filled with heat conducting medium, then descaling of the surface takes place under the effect of shock waves emerging when cavitation air bubbles collapse. In addition, multiple bubbles not associated with cavitation phenomena are formed in the liquid. These bubbles penetrate the pores, fissures and gaps between the scale and the surface of heat exchanging equipment. The bubbles intensively vibrate under the action of ultrasonic oscillations also causing disintegration of the upper layer of the scale. Ultrasonic cavitation in a liquid depends on its density, viscosity, temperature, molecular weight, compressibility, concentration of gas, presence of microscopic impurities, frequency and intensity of ultrasonic oscillations, static pressure, etc. It is shown that activity of the cavitation process can be influenced in the required direction by purposefully changing some of these factors. Quality and rate of cleaning are determined by the acoustic power and frequency of the vibrations, by the temperature and composition of the working solution.

High frequency oscillation accelerates chemical and physical processes occurring in the liquid. Generators of UZG type with PMS-type magnetostriction converters can be used for the purpose. Ultrasonic transducer converts electrical oscillations applied to it into mechanical oscillations of the same frequency. Frequency bands from 18 kHz to 44 kHz with oscillation intensities from 0.5 W/cm² to 10 W/cm² are used in the majority of installations. The upper boundary of the frequency band is predetermined by the mechanism of formation and destruction of cavitation bubbles: at very high frequency bubbles do not have sufficient time to collapse which reduces the micro-impact produced of cavitation. Cleaning of most insignificantly small pores is achieved due to the fact that forces acting on the impurity particles are more or less uniformly distributed within the volume of the washing solution. Quality of ultrasonic cleaning is by far better than that achieved using other methods. Special advantage of ultrasonic cleaning is associated with its high productivity and low manual labor expenditures; by easy maintainability and relative simplicity of equipment and possibility to replace flammable and expensive organic solvents with safe and cheap aqueous solutions of alkaline salts.

Key words: ultrasound, cavitation, acoustic flows, heat transfer equipment, quality cleaning, technology.

REFERENCES

1. Agranat B.A. *Ultrasonic technology*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1984. 503 p. (in Russian).
2. Agranat B.A., Bashkirov V.I., Kitaygorodsky Y.I. *Ultrasonic cleaning*. Moscow. Nauka Publ., 1970, 260 p. (in Russian).
3. Rozenberg L.D. *Basic physics of ultrasonic technology*. Moscow. Nauka Publ., 1990. 686 p. (in Russian).
5. Bronin F.A. *Installation series USWF*. Moscow. Nauka Publ., 1998. 47 p. (in Russian).
6. Donskoy A.V. *Ultrasonic electrical installation*. Moscow. Energiya Publ., 1978. 275 p. (in Russian).
7. Keller O.K., Kratom G.S., Lubianitsky G.D. *Ultrasonic cleaning*. Leningrad. Mashinostroenie Publ., 1977. 243 p. (in Russian).
8. Bergman L.I. *Ultrasound and its application in science and technology*. Moscow. The foreign literature publishing house, 1967. 113 p. (in Russian).
9. Halamina I.P. *Ultrasound. A small encyclopaedia*. Moscow. Sovetskaya enciklopediya Publ., 1979, pp. 242-247 (in Russian).
10. Medvedev A.M. *Ultrasonic cleaning of electronic modules. Components and technologies*. Moscow. Nauka Publ., 2001, no. 15. pp. 20-24 (in Russian).
11. Buryakova N.E. Washing with ultrasound: myth or reality? *Potrebitel'*. 2005, no. 11, pp. 11-18 (in Russian).
12. Rosenberg L.D., Sirotiyuk M.G. On sound radiation in the presence of cavitation. *Akusticheskij zhurnal*, 1960, v. 6, no. 4, pp. 478-486 (in Russian).
13. Rozenberg L.D. *The cavitation region. Powerful ultrasonic fields. Physics and technique of powerful ultrasound*. Moscow. Nauka Publ., 1968, pp. 221-266 (in Russian).
14. Shestakov S.D. Mathematical model of hydrodynamic cavitation. Proc. of the XVI session of the Russian acoustical society. Moscow. GEOS Publ., 2005, pp. 71-73 (in Russian).
15. Knapp R., Daily J., Hammit F. *Cavitation*. Moscow. Mir Publ., 1974. 246 p. (in Russian).
16. Smart V.L. Ultrasonic cleaning of parts. *Primemenie ul'trazvuka v tekhnologii mashinostroeniya*. 1969, v. 1, p. 201 (in Russian).
17. Rykov N.C. Ultrasonic cleaning of parts. *Primemenie ul'trazvuka v tekhnologii mashinostroeniya*. 1961, v. 2, pp. 111-112 (in Russian).
18. Truell R., Elbaum H. Chick B. *Ultrasonic methods in solid state physics*. Moscow. Mir Publ., 1972, 243 p. (in Russian).
19. Nikolaevsky N.N. The ultrasonic method preventing scale formation. *Novosti teplosnabzheniya*. 2002, no. 10, pp. 44-45 (in Russian).
20. Ultrasonic Metal Spot Welder Frontier. KORMAX SYSTEM. Available at: <http://www.kormax.co.kr/> (accessed Apr. 10 2017).

Author

Minin Sergey Ivanovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: akid@inbox.ru