

Метод Расчёта Оптимальных Интенсивностей Ультразвукового Кавитационного Воздействия На Вязкие и Высокодисперсные Жидкие Среды

Vladimir N. Khmelev, *Senior Member, IEEE*, Roman N. Golykh, *Student Member, IEEE*, Sergey S. Khmelev, Roman V. Barsukov

Biysk Technological Institute (branch) Altai State Technical University after I.I. Polzunov, Biysk, Russia

Аннотация – Статья посвящена рассмотрению нового подхода к ускорению технологических процессов в вязких и высокодисперсных жидких средах за счет воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, обеспечивающими возникновение кавитации. В статье показано, что известная методика оценки требуемых мощностей УЗ технологических аппаратов непригодна для использования при проектировании специализированного оборудования, предназначенного для обработки высоковязких или высокодисперсных жидких сред. Предложен усовершенствованный метод расчёта необходимых интенсивностей воздействия, при которых наступает режим развитой кавитации, применительно к вязким и высокодисперсным средам для выявления требуемых энергетических режимов работы ультразвуковых электронных генераторов. Полученные результаты позволяют рекомендовать выбор оптимальных интенсивностей (до 30 Вт/см²) ультразвукового воздействия к жидкостям с вязкостью до 0,6 Па·с (масло, глицерин, эпоксидная смола и т.д.), наиболее часто используемым на практике.

Ключевые слова – Ультразвук, кавитация, вязкость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности (более 3...10 Вт/см²) позволяет интенсифицировать различные технологические процессы, протекающие в жидких средах. Уникальность и эффективность ультразвукового воздействия в жидких средах объясняется явлением кавитации – взрывающимися, с созданием ударных волн и кумулятивных струй, парогазовыми пузырьками.

Традиционными средами для эффективной реализации УЗ технологий (растворение, экстрагирование, диспергирование, эмульгирование) являются вода, органические растворители с малыми вязкостью и затуханием. Для интенсификации технологических процессов в средах, значительно отличающихся по своим свойствам от воды и имеющих высокую вязкость, УЗ колебания практиче-

ски не используются, хотя результаты лабораторных исследований [1,2], свидетельствуют о принципиальной возможности кавитационного ускорения процессов в вязких средах (с вязкостью до 0,6 Па·с).

Сложность реализации процессов в таких средах обусловлена отсутствием специализированного УЗ оборудования, способного обеспечить высокоинтенсивное воздействие (более 25 Вт/см²), необходимое для обеспечения режима развитой кавитации в вязких средах [3] при обработке жидкостей в объемах, продольный размер которых значительно превосходит размеры излучателей (реализация режима бегущей волны).

Необходимые мощностные режимы работы существующего ультразвукового оборудования для кавитационной обработки жидкостей определялись с использованием методики, разработанной в работе [1].

Однако известная методика определения необходимых диапазонов перестройки технологических аппаратов по мощности основывается на допущении о полном отсутствии вязкости жидкости. Наличие же вязкости значительно снижает эффективность ультразвукового воздействия или делает невозможным использование существующих ультразвуковых аппаратов.

В связи с этим возникла необходимость в уточнении известной методики, позволяющей определить эффективность кавитационного кавитационной обработки жидких сред в зависимости от параметров ультразвукового воздействия.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основным параметром, характеризующим эффективность кавитационного воздействия, является индекс кавитации, который определяется как отношение объема кавитационных пузырьков ΔV к объему жидкости V , в котором локализовано это облако.

При этом среднее во времени волновое сопротивление

эквивалентной среды можно записать в виде [4]:

$$\rho_{c_K} = \rho_{c_{ж}} \left(\frac{1 - \bar{K} + \frac{\rho}{\beta} \frac{1}{\bar{K}}}{1 - \bar{K} + \frac{\rho}{\beta} \frac{1}{\bar{K}}} \right)^1 \quad (1)$$

где c_K – скорость звука в кавитирующей жидкости, $c_{ж}$ – скорость звука в сплошной жидкости, \bar{K} – средний индекс кавитации.

В монографии [1] показана возможность контроля величины значения волнового сопротивления жидкости в процессе ультразвукового воздействия, которая позволяет управлять процессом создания и поддержания заданного уровня ультразвуковой кавитации, т.е. оптимизировать процесс. При этом устанавливается такое значение интенсивности воздействия (оптимальная интенсивность), при которой волновое сопротивление обрабатываемой среды (1) практически неизменно при дальнейшем увеличении выводимой УЗ энергии.

В рамках существующей методики выражение для индекса кавитации можно записать в следующем виде

$$K = \frac{V_{сф}}{V_{сф}} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 - r_0^3}{\frac{4}{3}\pi R_{MAX}^3 - r_0^3} = \frac{R^3 - r_0^3}{R_{MAX}^3 - r_0^3}$$

где R – средний радиус кавитационного пузырька, R_0 – радиус зародыша, R_{MAX} – максимальное значение радиуса кавитационного пузырька (резонансный радиус), к которому он стремится в фазе разряжения.

Математическая модель, используемая для определения величин R и R_{MAX} , основывается на допущении о полном отсутствии вязкости жидких сред. В связи с этим для определения индекса кавитации линейно- и нелинейно-вязких жидкостей, согласно модели [1] необходимо получить зависимости резонансных размеров и средних радиусов парогазовых пузырьков от параметров воздействия с учетом вязкости.

III. ТЕОРИЯ

Для получения выражения для резонансного размера кавитационной полости обобщается линейная теория Миннерта, разработанная для невязких кавитирующих жидкостей на случай вязких жидкостей. Динамика кавитационного пузырька в линейно-вязкой несжимаемой жидкости описывается следующим уравнением [3]:

$$\rho \left(\frac{3\dot{R}}{2} + R\ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{z0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \left(-4\eta \frac{\dot{R}}{R} - p_{\infty} \right) \quad (2)$$

где ρ – плотность рассматриваемой жидкости; R – радиус газового пузырька; R_0 – радиус зародыша; p_{z0} – давление газа в зародыше; σ – поверхностное натяжение жидкости; η – вязкость жидкости; p_{∞} – давление жидкости на больших расстояниях от центра кавитационной полости; γ – показатель адиабаты для воздуха.

Если пузырёк пульсирует, изменяя свои размеры незначительно, то

$$p_{\infty} = p_0 + \alpha \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

$$R = R_{MAX} \left(1 + \alpha \sin(\omega t + \varphi) \right) \quad (4)$$

где α – относительная амплитуда колебаний радиуса пузырька; R_{MAX} – средний размер полости; p – амплитуда колебаний давления жидкости; p_0 – статическое давление; ω – круговая частота акустических колебаний; φ – фазовый сдвиг малых колебаний полости относительно колебаний жидкости.

Находим решение уравнения (2) относительно ω с учетом условия резонанса для α , подставив в него выражения (3) и (4).

Отсюда получается выражение для резонансной частоты f пузырька радиусом R_{MAX} :

$$f = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(3\gamma \left(\frac{2\sigma}{R_{MAX}} + p_0 \right) - \frac{2\sigma}{R_{MAX}} - \frac{\eta}{\rho R_{MAX}^2} \right)} \quad (5)$$

Индекс кавитации определяется по формуле, приведенной в [1], как отношение среднего куба радиуса пузырька к кубу резонансного радиуса. Средний куб радиуса кавитационной полости определяется на основании численного анализа уравнения (1).

Кроме материалов, характеризующихся линейной вязкостью в настоящее время возникает необходимость ультразвуковой кавитационной обработки жидкостей, особенность которых заключается в наличии зависимости вязкости от скорости сдвига (неньютоновские жидкости). К таким жидкостям относятся [5] концентрированные суспензии твёрдых частиц (с размерами частиц 20 мкм и менее), полимерные расплавы и растворы и т. д. Однако в настоящее время теория кавитации в неньютоновских жидкостях практически не развита, в связи с этим возникает необходимость построения теоретических моделей кавитирующих жидкостей с наличием зависимости вязкости от градиента скорости.

Для решения проблемы предложена модель, позволяющая определить зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени и параметров акустического воздействия.

При построении модели принимается допущение о радиальной симметрии кавитационного пузырька.

Поле обтекания жидкости описывается системой уравнений неразрывности и сохранения импульса в дифференциальной форме.

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \operatorname{div} \mathbf{P} \end{cases}$$

где \mathbf{v} – скорость движения жидкости; \mathbf{P} – тензор напряжений жидкости; ρ – плотность жидкости.

С учетом зависимости вязкости жидкости от скорости сдвига необходимо найти новое значение тензора напряжений.

Тензор напряжений нелинейно-вязкой несжимаемой жидкости описывается следующим соотношением [5]:

$$\mathbf{P} = -p\mathbf{I} + \tau \mathbf{D},$$

$$\tau \mathbf{D} = \eta b_2 \mathbf{D},$$

где D_2 – скорость сдвига; $\eta(D_2)$ – вязкость жидкости, \mathbf{I} – единичный тензор 2-го ранга; \mathbf{D} – тензор скоростей деформации.

С учетом уравнения неразрывности и радиальной симметрии кавитационной полости радиальная скорость движения жидкости представляется в виде:

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{C}{r^2},$$

где C – величина, независящая от координаты точки жидкости, а только от времени; v – радиальная скорость движения жидкости; r – расстояние от центра кавитационной полости; φ – потенциал скорости движения жидкости.

После проведения ряда преобразований получено следующее выражение для скорости сдвига в зависимости от расстояния от центра кавитационного пузырька:

$$D_2 = \frac{C}{r^6}$$

С учетом найденной скорости сдвига уравнение сохранения импульса запишется в следующем виде:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v^2}{2} \right) \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \eta b_2}{\partial r} \left(2r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{2v}{r} \right)$$

Граничные условия для давления запишутся следующим образом:

$$p = -\frac{\gamma \sigma}{R} + \gamma_{20} \left(\frac{R_0}{R} \right)^\gamma - \eta \left(-\frac{C}{R^6} \right) \frac{C}{R},$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; p_{20} – давление газа в зародыше; R_0 – радиус зародыша.

А скорость движения жидкости вблизи стенки пузырька равна:

$$v|_{r=R} = \dot{R},$$

где r – расстояние от центра кавитационной полости; v – радиальная скорость движения жидкости.

С учетом граничных условий и уравнения сохранения импульса уравнение пульсаций кавитационного пузырька

в нелинейно-вязкой жидкости запишется следующим образом:

$$\rho \left(\frac{\dot{R}^2}{2} + R \ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{20} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{\gamma} + 4\eta \left(-\frac{6C^2}{R^6} \right) \frac{\dot{R}}{R} - \int_R^\infty \frac{144C^3}{r^{10}} \frac{\partial \eta}{\partial \gamma} dr$$

Легко видеть, что в случае отсутствия зависимости вязкости от скорости сдвига ($\frac{\partial \eta}{\partial \gamma} = 0$) уравнение сводится к уравнению пульсаций кавитационного пузырька в линейно-вязкой жидкости.

Для определения резонансного размера кавитационной полости представим вязкость в виде степенного ряда по скорости сдвига.

Если $\eta = \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n v^n$, то получается

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\dot{R}^2}{2} + R \ddot{R} \right) &= -\frac{\gamma \sigma}{R} + \gamma_{20} \left(\frac{R_0}{R} \right)^\gamma + \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n \left(-\frac{C}{R^6} \right) \frac{\dot{R}}{R} - \\ &- \int_R^\infty \frac{44C^3}{r^{10}} \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n \left(-\frac{C}{r^6} \right)^n dr = -\frac{\gamma \sigma}{R} + \gamma_{20} \left(\frac{R_0}{R} \right)^\gamma + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n \left(-\frac{C}{R^6} \right)^n \frac{\dot{R}}{R} - \\ &- 44C^3 \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n \left(-\frac{C}{R^6} \right)^n \int_R^\infty \frac{1}{r^{4+6n}} dr = -\frac{\gamma \sigma}{R} + \gamma_{20} \left(\frac{R_0}{R} \right)^\gamma + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n \left(-\frac{C}{R^6} \right)^n \frac{\dot{R}}{R} - \\ &- 44R^6 \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n \left(-\frac{C}{R^6} \right)^n \frac{1}{6+6n} R^{3+6n} \end{aligned}$$

При рассмотрении малых колебаний пузырька вокруг резонансного радиуса и пренебрежении членами порядка малости, начиная со 2-го, получается:

$$\rho \left(\frac{\dot{R}^2}{2} + R \ddot{R} \right) = -\frac{\gamma \sigma}{R} + \gamma_{20} \left(\frac{R_0}{R} \right)^\gamma - \eta \frac{\dot{R}}{R}$$

Таким образом, для нахождения резонансного радиуса пузырька в нелинейно-вязких жидкостях применима формула (5) для линейно-вязких жидкостей, в которой за вязкость принимается вязкость при скорости сдвига, близкой к нулю. Таким образом, на резонансный размер нелинейность вязкости жидкости существенного влияния не оказывает.

Рассмотренная модель кавитирующей нелинейно-вязкой жидкости может быть использована для практического установления определённого индекса кавитации в автоматическом режиме с использованием методики, описанной для вязких жидкостей в предыдущих разделах.

Для определения резонансного размера кавитационной полости и среднего куба размера полости для нахождения индекса кавитации с помощью метода, рассмотренного в [1], используется модель кавитирующей нелинейно-вязкой жидкости, описанная ранее.

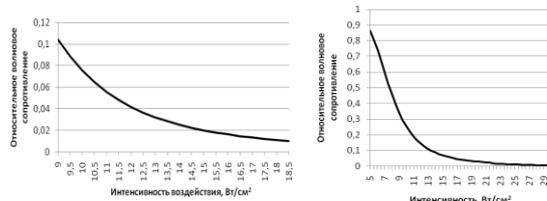
IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

С использованием модели, предложенной в монографии [1] и её обобщением на случай вязких жидкостей получен ряд зависимостей индекса кавитации и волнового сопротивления среды от интенсивности воздействия при частоте акустических колебаний, равной 22 кГц. Выбор данного значения частоты обусловлен её наиболее частым использованием в современных ультразвуковых технологических аппаратах. Построение зависимостей и сравнительный анализ производился для 8 жидкостей, наиболее часто используемых на практике: вода, спирт, трансформаторное масло, оливковое масло, глицерин, моторное масло, эпоксидная смола, нефть.

На рисунках 1 и 2 приведены зависимости относительного волнового сопротивления обрабатываемой среды от интенсивности воздействия для различных жидкостей.

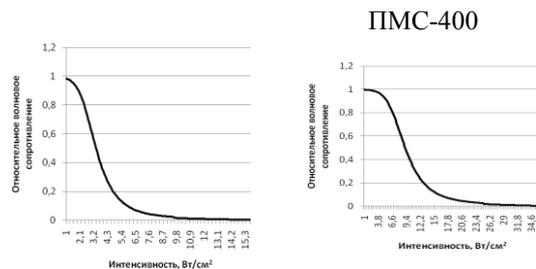


Рисунок 1 – Зависимость относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для маловязких жидкостей: воды, спирта, трансформаторного масла и оливкового масла



а) глицерин

б) моторное масло



в) эпоксидная смола ЭД-5

г) нефть

Рисунок 2 – Зависимость относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для глицерина (а), моторного масла ПМС-400 (б), эпоксидной смолы ЭД-5 (в), нефти (г)

Анализ представленных зависимостей позволяет установить, что начиная с некоторого значения, волновое сопротивление обрабатываемой среды практически не изменяется, что соответствует режиму «развитой» кавитации. Неизменность волнового сопротивления, начиная с определённой пороговой интенсивности, принимается в качестве критерия оптимальности вводимой УЗ энергии.

В таблице 1 приведены численные показатели интенсивности, при которой в жидкой среде наступает «развитый» кавитационный процесс для различных жидкостей с указанием вязкости каждой из них. Плотности рассматриваемых жидкостей находятся в диапазоне от 750 до 1300 кг/м³.

Таблица 1 – Параметры жидкостей и интенсивности воздействия для каждой из них, соответствующие режиму «развитой» кавитации

Вид жидкости	Вязкость, 10 ⁻³ Па·с	Оптимальная интенсивность, Вт/см ²
Вода	0,82	2...3
Этиловый спирт (96%)	1,2	3...5
Трансформаторное масло	30	4...6
Оливковое масло	85	5...8
Глицерин	~600	15...18
Моторное масло ПМС-400	400	19...23
Эпоксидная смола ЭД-5	320	10...13
Нефть	400	26...31

Приведённые зависимости на рисунках 1 и 2 и данные, представленные в таблице 1, позволяют установить, что при прочих равных условиях, наличие вязкости влечёт за собой достижение меньшей степени развитости кавитации и больших значений оптимальных интенсивностей акустического воздействия.

Далее представлены зависимости относительного волнового сопротивления и индекса кавитации от величины звукового давления и интенсивности воздействия для идеальной и линейно-вязкой жидкости, а также для суспензии твёрдых частиц, которые являются дилатантными жидкостями, позволяющие провести сравнительный анализ оптимальных интенсивностей воздействия для рассматриваемых классов жидкостей.

На рисунке 3 приведены зависимости индекса кавитации от величины звукового давления (в Па), на рисунке 4 приведены зависимости отношения волнового сопротивления к волновому сопротивлению

рассматриваемой жидкости $\frac{\rho_{сж}}{\rho_{сК}}$ для дилатантной, идеальной и линейно-вязкой жидкости при прочих равных условиях, т. е. значения всех физических свойств жидкостей за исключением вязкости одинаковы и совпадают со значениями плотности, поверхностного натяжения, скорости звука.

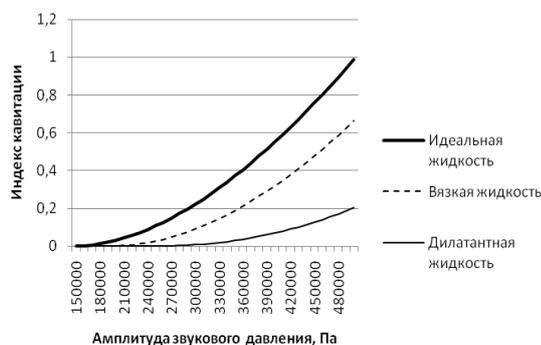


Рисунок 3 – Зависимости индекса кавитации от величины звукового давления для идеальной, вязкой и дилатантной жидкости

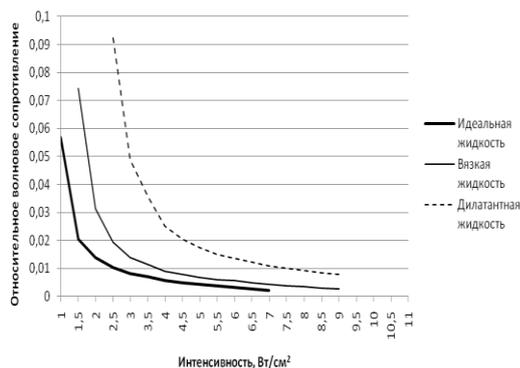


Рисунок 4 – Зависимости относительного волнового сопротивления от величины звукового давления для идеальной, вязкой и дилатантной жидкости

Обобщение представленных зависимостей позволяет сделать выводы об уменьшении степени развитости кавитации (рисунок 3) и увеличении оптимальной амплитуды колебаний давления среды (рисунок 4) за счёт

влияния вязкости обрабатываемой жидкости, а также за счёт роста вязкости с увеличением скорости сдвига.

Теоретически полученные высокие значения необходимых интенсивностей воздействия (до 25...30 Вт/см²) для обработки высоковязких жидкостей позволяют объяснить невозможность использования существующего ультразвукового технологического оборудования.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения результатов теоретических исследований был проведен ряд экспериментов, заключавшихся в подтверждении оптимальных интенсивностей ультразвукового воздействия для различных жидкостей.

При проведении экспериментов был использован ультразвуковой аппарат серии «Волна-М» мощностью 1000 Вт, с регулируемой мощностью и с системой автоматической настройки на режим развитой кавитации. Для воздействия на жидкую среду была использована двухполуволновая УЗКС с грибовидным рабочим окончанием, совершающим поршневые колебания, диаметром 40 мм и площадью излучения 20 см² (с учетом задней конусной части инструмента). Резонансная частота УЗКС на воздухе – 19,75 кГц.

В качестве исследуемых сред для проведения экспериментов были использованы: воздушная среда, вода (вязкость 0,82 сПз), масло машинное с индексом вязкости по классификации SAE 10W-40, глицерин, масло растительное, эпоксидная смола марки ЭД-5 (вязкость до 1000 сПз при комнатной температуре).

Выбор указанного ряда технологических сред обусловлен необходимостью изучения реализации максимально широкого диапазона технологических процессов.

Обработка жидкостей проводилась в вертикальном технологическом объеме цилиндрической формы при нормальных условиях. Диаметр технологического объема составлял 100 мм, а высота – ~0,5 м, что даёт основание считать рассматриваемую среду акустически бесконечной за счёт практически полного отсутствия отражающих явлений ввиду потерь энергии на поддержание кавитации.

В ходе экспериментов исследован характер зависимостей сопротивления излучения УЗКС (Рисунок 5) от подводимого напряжения, определяющего интенсивность воздействия. Под сопротивлением излучения $R_{ИЗЛ}$ подразумевается активное сопротивление пьезоэлемента УЗКС на резонансной частоте при погружении колебательной системы в жидкую среду с вычетом ($R_{СР}$) активного сопротивления УЗКС в отсутствии нагрузки (в воздухе) ($R_{УЗКС}$).

$$R_{ИЗЛ} = R_{СР} - R_{УЗКС}$$

Сопротивление излучения определяется волновым сопротивлением обрабатываемой среды [1].

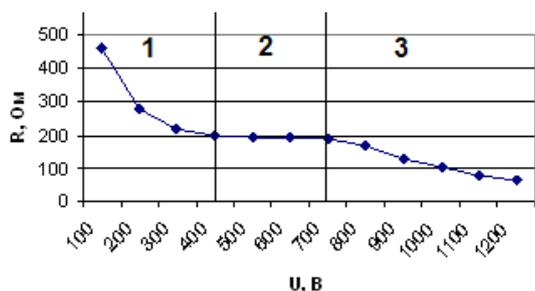


Рисунок 5 – Зависимости полного сопротивления излучения колебательной системы от её напряжения питания

Пространство системы координат графика (рисунок 5) разделено на три участка в соответствии со стадиями развития кавитации.

Участок 1. На этом участке происходит первоначальное резкое, затем плавное уменьшение полного сопротивления излучения. При этом степень развитости кавитации в среде еще недостаточна и, следовательно, затраты энергии на поддержание кавитации невелики и мало сказываются на значениях полного сопротивления излучения колебательной системы. Таким образом, основным действующим фактором, снижающим сопротивление излучению, на этом участке является значительное снижение волнового сопротивления жидкости.

Участок 2. Этот участок соответствует развитой кавитации в среде, и в границах этого участка значение полного сопротивления излучения системы остается постоянным. Постоянство значения полного сопротивления излучения определяется тем, что волновое сопротивление жидкости достигло минимального значения и остается постоянным. Кавитационная составляющая сопротивления излучению на этом участке, напротив, достигла своего максимума и остается постоянной до тех пор, пока пузырьки не достигнут максимальных размеров и не начнется процесс их вырождения в резонансные.

Участок 3. На этом участке происходит постепенное вырождение кавитационных пузырьков в резонансные и соответственно снижение кавитационной эффективности. При этом уменьшаются и затраты энергии на поддержание кавитации, что характеризуется уменьшением кавитационной составляющей сопротивления излучения. Волновое сопротивление жидкости при этом сохраняет свое минимальное значение. Все это приводит в конечном итоге к уменьшению полного сопротивления излучения колебательной системы.

Максимальная кавитационная эффективность достигается на участке 2, поэтому при работе ультразвукового технологического аппарата, использованного в экспериментах, устанавливается такое значение оптимальной интенсивности в автоматическом режиме, при котором измеренное активное сопротивление излучения для обрабатываемой среды практически неизменно.

С использованием указанного ультразвукового технологического аппарата в ходе экспериментальных исследований для различных жидкостей определялась по-

требляемая мощность аппарата P и акустическая мощность $P_{акуст}$, вводимая в обрабатываемую среду в режиме развитой кавитации (участок 2 на зависимости, представленной на рисунке 5).

Из полученных экспериментальных значений рассчитывается оптимальная интенсивность I , которую необходимо создавать для получения режима развитой кавитации для различных по вязкости жидкостей, как $I = \frac{P_{акуст}}{S_{изл}}$, где $S_{изл}$ — площадь излучающей поверхности рабочего окончания колебательной системы, равная 20 см^2 . Результаты экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований ультразвуковой кавитационной обработки вязких жидкостей

Наименование жидкости	КПД аппарата, %	Интенс. воздействия, Вт/см ²
Вода	50	3,75
Машинное масло	50	12,5
Глицерин	47	15,75
Подсолнечное масло	45	18
Эпоксидная смола ЭД-20	40	24

Полученные значения позволяют говорить о сопоставимости результатов, полученных при помощи математической модели, и экспериментальных данных. Установлено также, что увеличение вязкости жидкости приводит к снижению КПД ультразвукового технологического аппарата.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы разработаны теоретические модели кавитационных процессов в различных технологических средах при воздействии на них ультразвуковых колебаний различной интенсивности. Предложен усовершенствованный метод расчета требуемых мощностных режимов. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие полученные теоретические результаты.

Выявлены причины, ограничивающие ввод УЗ колебаний в высоковязкие и высокодисперсные жидкие технологические среды и установлены оптимальные режимы УЗ воздействия на основании анализа разработанных моделей и проведенных экспериментальных исследований. Обнаружено существенное влияние вязкости на необходимую интенсивность воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хмелев, В.Н. Ультразвуковые multifunctionальные и специализированные аппараты для интенсификации техно-

гических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 414 с.

[2] **Хмелев, В.Н.** Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.

[3] **Новицкий, Б.Г.** Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) [Текст] / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.

[4] **Розенберг, Л.Д.** Мощные ультразвуковые поля [Текст] / Л. Д. Розенберг. – М: Наука, 1968. – 265 с..

[5] **Рудяк В.Я.** Статистическая аэрогидромеханика гомогенных и гетерогенных сред [Текст] / В II т. Т. 1. Кинетическая теория. / В. Я. Рудяк. – Новосибирск: НГАСУ, 2004. – 320 с.

В конце доклада должна быть опубликована краткая профессиональная биография с фотографией, как это практикуется в изданиях IEEE. Если статья имеет несколько авторов, то создается таблица, в которую включаются все авторы. Шрифт биографии Times New Roman 8pt.