

ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ И НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКИХ СРЕД

В.Н. Хмелёв¹, Р.Н. Голых¹, А.В. Шалунов¹, В.Е. Бажин², В.А. Нестеров¹

¹ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск

²Бийский технологический институт АлтГТУ, Бийск

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление оптимальных условий УЗ воздействия (геометрии технологического объёма) для кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидкостей. Разработанная модель формирования кавитационной области позволила выявить распределения кавитационных зон в различных по размерам и форме технологических объёмах. Проведённые экспериментальные исследования позволили подтвердить адекватность предложенной модели и возможность увеличения объёма зоны развитой кавитации путём оптимизации условий УЗ воздействия.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, вязкость, неньютоновская среда, кольцевые пластинчатые отражатели.

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие и жидкодисперсные среды, характеризующиеся значительной вязкостью (неотверждённые полимерные наноструктурированные материалы, лакокрасочные композиционные составы, смолы), получают все более широкое распространение в промышленности. Использование таких сред в качестве сырья позволяет придать уникальные свойства конечному продукту (высокая прочность полимерных композиционных материалов, превышающая прочность стали, биоцидные свойства лакокрасочных покрытий и т. д.). Это можно достичь путём модификации физико-химической структуры жидкостей. Многочисленными лабораторными исследованиями [1,2] доказано, что наиболее перспективным способом модификации физико-химической структуры исходных высоковязких жидких или жидкодисперсных сред с целью улучшения свойств и характеристик конечного продукта является УЗ кавитационное воздействие.

Например, в работе [1] установлено, что обработка эпоксидной смолы ЕРО 1441-30 УЗ колебаниями с интенсивностью 100 Вт/см² в течение 5 мин приводит к снижению её вязкости на 48 % за счёт разрушения макромолекул полимеров. Это, в свою очередь, приводит к улучшению пропитывающей способности смолы. Введение различного рода наномодификаторов [2] в полимеры с помощью УЗ воздействия приводит к повышению предела прочности получаемого материала при изгибе на 20%, при сжатии на 30%.

Указанные эффекты при УЗ воздействии обусловлены возникновением в жидкой среде схлопывающихся парогазовых пузырьков (явления кавитации), которые образуют высокоамплитудные ударные волны (с амплитудой давления во фронте не менее $8 \cdot 10^6$ Па), приводящие к разрыву химических связей, ускорению процессов массопереноса и т. д.

Однако, несмотря на положительные результаты лабораторных исследований, УЗ кавитационная обработка высоковязких жидких сред, которые в ряде случаев могут быть неньютоновскими (с зависимостью вязкости от скорости сдвига), в промышленности практически не реализована из-за малого объёма и сосредоточенности кавитационной зоны вблизи поверхности УЗ излучателя.

При этом для формирования кавитационной зоны, с объёмом необходимым для промышленной обработки жидкостей, оказываются недостаточными даже интенсивности УЗ колебаний (более 70 Вт/см²), близкие к пределу теоретической прочности волноводов-излучателей. А разработанные на сегодняшний день многозонные рабочие инструменты с развитой поверхностью излучения не обеспечивают решения проблемы сосредоточенности кавитационной зоны вблизи излучающей поверхности. Поэтому наиболее перспективным подходом к увеличению объёма формируемой кавитационной зоны является оптимизация условий УЗ воздействия (геометрии технологического объёма), обеспечивающих возникновение стоячих волн. При образовании стоячих волн происходит сложение падающей и отражённой волны, что позволяет не менее чем 2-кратно усилить амплитуду УЗ давления (интенсивность УЗ колебаний) во всей области жидкости. Это приведёт к увеличению объёма зоны, в которой интенсивность УЗ колебаний превышает некоторое пороговое значение, требуемое для образования зоны развитой кавитации [2], и тем самым увеличится объём данной зоны. Таким образом, обеспечивается повышение эффективности УЗ обработки высоковязких и неньютоновских жидкостей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для выявления оптимальных условий УЗ воздействия необходимо решить ряд частных задач:

1. Разработать феноменологическую модель формирования кавитационной области в неньютоновской жидкости, позволяющую определять форму и размеры кавитационных зон в жидкой среде при различных режимах развития кавитации.

2. С использованием разработанной модели определить размеры технологических объёмов, обеспечивающие увеличение объёма формируемой кавитационной области при УЗ обработке жидкостей.

3. Экспериментально исследовать условия формирования кавитационной области для подтверждения полученных теоретических результатов.

Для решения первой задачи была разработана модель формирования кавитационной области в неньютоновской жидкости, которая описана далее.

ТЕОРИЯ

«Строительным» кирпичиком модели кавитационной области является обобщённое уравнение динамики кавитационного пузырька в неньютоновской жидкости (с учётом её сжимаемости), приведённое в работе исследователей Уэльского университета [3]:

$$\begin{aligned}
 & R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 \left(1 - \frac{\partial R}{3C} \right) = \\
 & = H \left(1 + \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \frac{R}{C} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right) - \\
 & - \frac{1}{\rho_\infty} \left(1 + \frac{\partial R}{C} \right) \int_R^\infty \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r}(r) + \frac{3\tau_{rr}}{r}(r) \right) \partial r + \\
 & + \frac{1}{\rho_\infty} \frac{R}{C} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} \left(R, \frac{\partial R}{\partial t} \right) + \frac{3\tau_{rr} \left(R, \frac{\partial R}{\partial t} \right)}{R} \right) \frac{\partial R}{\partial t}
 \end{aligned} \quad ; \quad (1)$$

где $\tau_{rr} \left(R, \frac{\partial R}{\partial t} \right)$ – радиальная компонента тензора вязких напряжений жидкости, Па, R – мгновенный радиус кавитационного пузырька, м, H – энтальпия жидкости, $\text{м}^2/\text{с}^2$, C – локальная скорость звука в жидкости, м/с, ρ_∞ – равновесная плотность сплошной жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$, r – расстояние от центра кавитационного пузырька, м.

Функция $\tau_{rr} \left(R, \frac{\partial R}{\partial t} \right)$ определяется тремя характеристиками реологических свойств жидкости: начальная вязкость μ_0 (Па·с), показатели консистенции K

(Па·с ^{N}) и нелинейности N . При этом в зависимости от реологических свойств, которые оказывают основное влияние на кавитационный процесс, жидкости подразделяются на *линейно-вязкие* (вязкость не зависит от скорости сдвига, $N=0$), *псевдопластические* (вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига, $N<0$) и *дилатантные* (вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига, $N>0$).

Предложенный подход к решению уравнения (1), основанный на независимом рассмотрении фаз расширения и схлопывания пузырька, позволяет на первом этапе определить зависимость радиуса пузырька $R(t, I)$ от времени t и интенсивности УЗ колебаний I . На следующем этапе с использованием уравнения коалесценции и дробления кавитационных пузырьков [4] определяется стационарная концентрация $n_\infty(I)$ и мгновенное объёмное содержание пузырьков $\delta(t, I) = \frac{4}{3} \pi R^3(t, I) n_\infty(I)$ в зависимости от времени и интенсивности УЗ колебаний.

На основании полученных данных (объёмное содержание кавитационных пузырьков), производится нахождение распределения интенсивностей на основании решения волнового уравнения (2):

$$\begin{aligned}
 & \Delta \left(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})} e^{i\varphi(\mathbf{x})} \right) + \\
 & + \frac{\omega^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{\rho_0 c_0^2 \bar{\delta}_1 \left(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})} e^{i\varphi(\mathbf{x})} \right)}{\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})} e^{i\varphi(\mathbf{x})}} \right) \sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})} e^{i\varphi(\mathbf{x})} = 0
 \end{aligned} \quad ; \quad (2)$$

где I – интенсивность УЗ колебаний, Вт/м², φ – фазовый сдвиг колебаний звукового давления в жидкости, ω – круговая частота первичного УЗ поля, с⁻¹, c_0 – скорость звука в сплошной жидкости, м/с, ρ_0 – равновесная плотность сплошной жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$, ρ – плотность кавитирующей жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$, c – скорость звука в кавитирующей жидкости, м/с, $\bar{\delta}_1 \left(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})} e^{i\varphi(\mathbf{x})} \right)$ – комплексная амплитуда изменения объёмного содержания кавитационных пузырьков относительно среднего значения, \mathbf{x} – радиус-вектор точки жидкости, м.

Распределение интенсивностей УЗ колебаний, найденное на основании уравнения (2) при известной геометрии УЗ излучателя и технологического объёма, позволяет однозначно установить распределение кавитационных зон в объёме обрабатываемой жидкости.

Это достигается путём анализа выявленной функциональной зависимости радиуса кавитационного пузырька $R(t, I)$ от времени t и интенсивности УЗ колебаний I . Далее в зависимости от поведения кавитационного пузырька с течением времени в каждой точке жидкости (согласно функциональной зависимости $R(t, I)$) при найденном распределении интенсивностей $I(\mathbf{x})$ устанавливаются формы и положения кавитационных зон в технологическом объёме, соответствующих следующим режимам:

1) *режиму отсутствия кавитации*, в котором нет схлопывания пузырьков (скорость движения стенок

пузырька не превышает скорость звука в сплошной жидкости – 1500 м/с);

2) *режиму зарождающейся кавитации* – схлопывание пузырьков происходит с малыми амплитудами давления ударных волн (менее $20 \cdot 10^5$ Па), и ускорение физико-химических процессов в жидкостях под воздействием УЗ является ничтожно малым;

3) *режиму развитой кавитации* – схлопывание пузырьков происходит с максимальными амплитудами давления ударных волн ($20 \cdot 10^5 \dots 80 \cdot 10^5$ Па); в качестве критерия режима развитой кавитации принято наличие разрушения алюминиевой фольги толщиной 9 мкм под воздействием кавитации;

4) *режиму вырождающейся кавитации* – интенсивность схлопывания пузырьков существенно снижена по сравнению с режимом развитой кавитации, и пузырьки, как правило, совершают радиальные колебания без схлопывания в течение 2-х периодов первичной УЗ волны и более с момента начального расширения;

5) *режиму вырожденной кавитации* – схлопыва-

ние пузырьков отсутствует, и они совершают радиальные колебания в окрестности большого радиуса (не менее 300 мкм).

На рис. 1а-в приведены формы и обозначены размеры кавитационных зон в плоскости симметрии УЗ излучателя, соответствующие пяти выше обозначенным режимам развития кавитации, для различных интенсивностей УЗ воздействия в неограниченном объеме без отражателей. Вязкость модельной жидкости – 100 мПа·с, модельный УЗ излучатель – поршневого типа (диаметр рабочего инструмента – 40 мм). Из рис. 1а-в видно, что начиная с $16,25 \text{ Вт/см}^2$ для модельной жидкости дальнейшего увеличения зоны развитой кавитации не происходит. Это означает снижение КПД УЗ оборудования при превышении интенсивностью УЗ воздействия оптимального значения. Поэтому необходимо создавать условия для оптимального распределения УЗ давления, например путем создания рабочих объемов с отражающими поверхностями (рис. 1г-д)

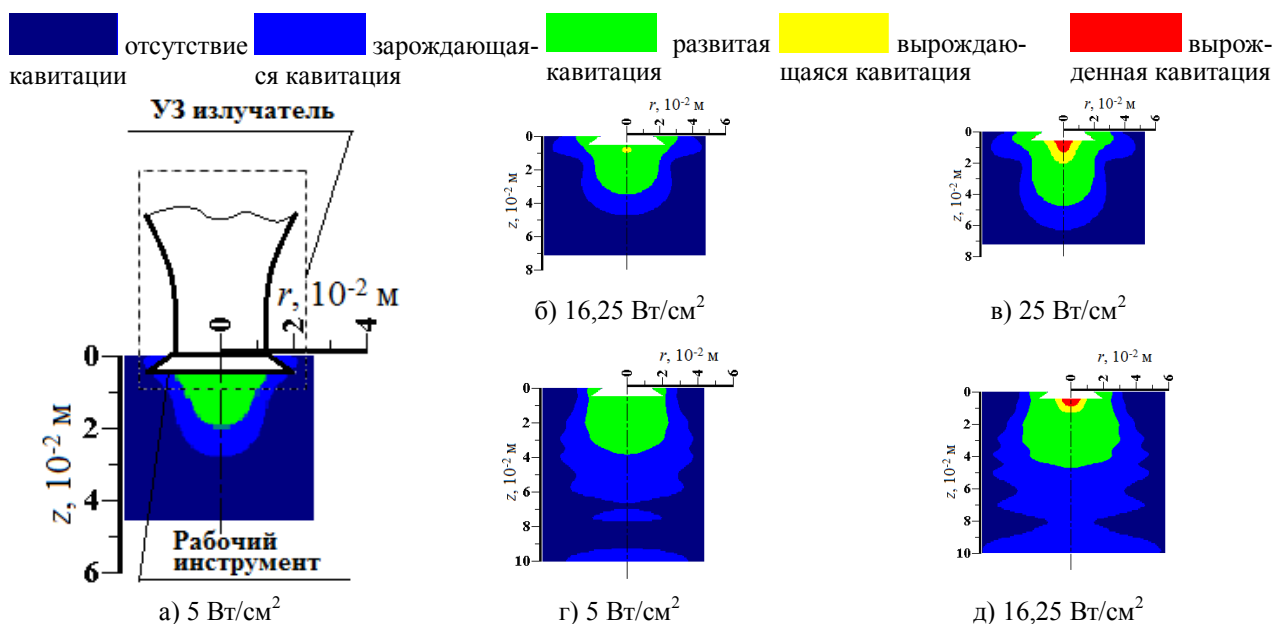


Рис. 1. Распределение кавитационных зон в жидкости с вязкостью 100 мПа·с для различных интенсивностей УЗ воздействия, создаваемых вблизи излучающей поверхности (r – расстояние от акустической оси излучателя, z – протяжённость кавитационной зоны)

Как следует из рис. 1г-д, зона развитой кавитации при наличии отражающей стенки увеличивается более чем на 0,5 см по протяжённости, и значительно увеличивается по ширине (в 1,2...1,3 раза), что свидетельствует о возможности увеличения объёма зоны развитой кавитации в 1,3...1,4 раза за счёт сложения падающей и отражённой волны.

Очевидно, что существует оптимальное расстояние, при котором объём зоны развитой кавитации будет максимальным. Наличие оптимального расстояния объясняется тем, что при малых расстояниях между излучателем и отражающей стенкой становит-

ся незначительным и полный объём обрабатываемой жидкости, а при больших расстояниях (когда распределение кавитационных зон близко к распределению, формируемому при отсутствии отражающей границы) зона развитой кавитации оказывается сосредоточенной вблизи излучающей поверхности (рис. 1а-в). Сосредоточенность зоны развитой кавитации вблизи излучающей поверхности обусловлена высоким коэффициентом поглощения УЗ волн в кавитирующей жидкости, превышающим 20 дБ/м.

На рис. 2а-в приведены зависимости оптимального расстояния от реологических свойств жидкостей. На-

личие оптимального расстояния, при котором полезный объём (в котором присутствует развитая кавитация) максимален, также проиллюстрировано приведенной на рис. 2г зависимостью объёма зоны развитой кавитации от расстояния между излучающей по-

верхностью и отражающей границей (вязкость модельной жидкости 100 мПа·с, интенсивность УЗ воздействия – 11,25 Вт/см²).

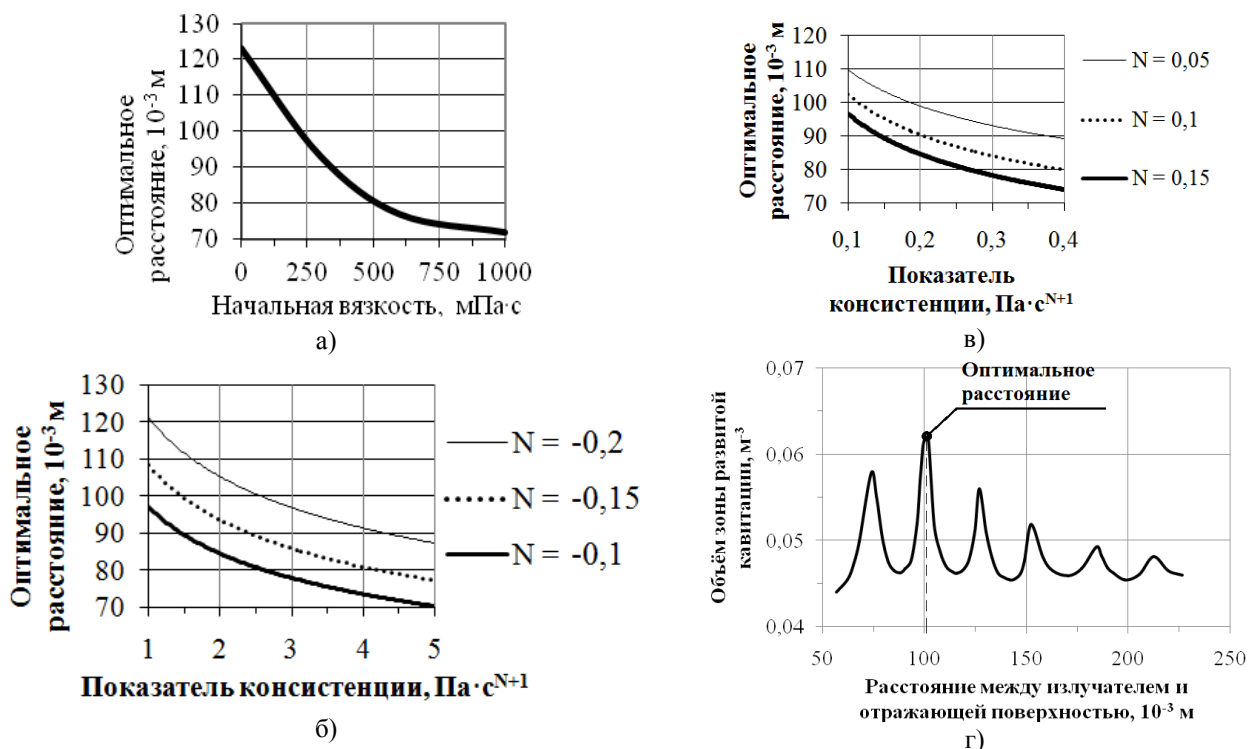


Рис. 2. Зависимости оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей от показателей, характеризующих реологические свойства жидкостей: а) линейно-вязкие; б) дилатантные; в) псевдопластические; и зависимость объёма зоны развитой кавитации от расстояния (г)

Для подтверждения полученных зависимостей, был проведен ряд экспериментов, заключавшихся в определении объёма формируемой кавитационной зоны в зависимости расстояния между излучателем и отражающей границей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования проводились с использованием стенда, приведённого на рис. 3.

Экспериментальное определение объёма зоны развитой кавитации производилось на основании оценки эрозионной активности кавитационной области по разрушению тестовых образцов алюминиевой фольги (толщиной 9 мкм).

Полученные экспериментальные зависимости объёма зоны развитой кавитации от расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей для различных по вязкости жидкостей приведены на рис. 4. А полученные экспериментальные значения максимально достигаемого объёма зоны развитой



Рис. 3. Экспериментальный стенд для выявления зависимости объёма зон развитой кавитации от расстояния между излучателем и отражающей границей

кавитации и оптимальных расстояний между излучателем и отражающей поверхностью для различных по реологическим свойствам жидкостей сведены в табл. 1.

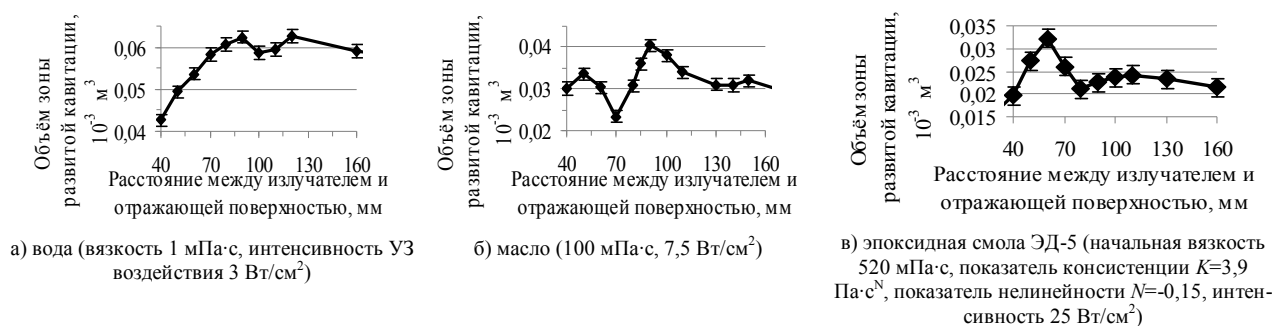


Рис. 4. Зависимости объёма зоны развитой кавитации от расстояния между излучателем и отражающей границей для различных жидкостей

Табл. 1. Экспериментальные значения объёмов зоны развитой кавитации и оптимальных расстояний между излучателем и отражающей поверхностью

Наименование жидкости	Экспериментальные значения объёма зоны развитой кавитации, 10^{-3} м^3		Значения оптимальных расстояний между излучающей поверхностью и отражающей границей		
	При оптимальном расстоянии между излучателем и отражателем	Без отражателя	Экспериментальные, $L_E, 10^{-3} \text{ м}$	Теоретические, $L_T, 10^{-3} \text{ м}$	Относительная погрешность, $ \frac{L_T - L_E}{L_E} \cdot 100, \%$
Вода	0,062576	0,057227	123	120	2,5
Масло	0,04044	0,0319	102	90	13,3
Эпоксидная смола ЭД-5	0,032212	0,021382	71	60	18,3

Полученные результаты (рис. 4, табл.1) подтверждают возможность увеличения объёма зоны развитой кавитации до 51% (например, для эпоксидной смолы ЭД-5 с начальной вязкостью не менее 0,5 Па·с) путём оптимизации расстояния между излучателем и отражающей границей при неизменной интенсивности воздействия. При этом согласно табл. 1 погрешность между теоретическими и экспериментальными значениями оптимального расстояния не превышает 15%, что свидетельствует об адекватности предложенной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная модель формирования кавитационной области позволила исследовать влияние условий распространения и отражения УЗ колебаний на совокупный объём, занимаемый зоной наиболее эффективного кавитационного воздействия, и разработать конструкции технологических камер, обеспечивающих повышение эффективности УЗ обработки. Модель позволила установить оптимальные расстояния между границей технологического объема и излучателем, обеспечивающие увеличение объёма зоны развитой кавитации более чем на 50%. Показано, что оптимальные расстояния находятся в диапазоне от 50 до 125 см, и уменьшаются при увеличении вязкости жидкости.

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной модели формирования кавитационной области и возможность

увеличения объёма зоны развитой кавитации путём оптимизации расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Huang, Y.D. Influence of ultrasonic treatment on the characteristics of epoxy resin and the interfacial property of its carbon fiber composites [Текст] / Y.D. Huang, L. Liu, J.H. Qiu, L. Shao // *Composit. Sci. Techn.* 2002. – Vol.62. – P.2153.
- Низина, Т.А.. Оптимизация свойств наномодифицированных эпоксидных композиционных материалов [Текст] / Т.А. Низина, П.А. Кисляков // *Строительные материалы.* – №9. – 2009. – с.78-80.
- Brujan, E.A. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids [Текст] / E.A.Brujan, P.R. Williams // *Rheology reviews.* – The British Society of Rheology, 2005. – pp. 147-172.
- Хмелев, В. Н.. Повышение эффективности ультразвукового воздействия на гетерогенные системы с несущей жидкой фазой высокой вязкости [Текст] / В. Н. Хмелев, Р.Н. Голых, А.В.Шалунов, С.С.Хмелев // *Электронный журнал «Юж.-Сиб. научный вестник».* – Бийск: БТИ АлтГТУ. – 2013. – №2. – С. 10-15.