

Центр ультразвуковых технологий

**ОСОБЕННОСТИ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ
(ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)**

Хмелёв Владимир Николаевич



Доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель РФ, Senior Member IEEE. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, автор более 1200 научных публикаций (в т.ч. более 100 патентов, более 20 монографий и учебников) Зам. директора по научной работе Бийского технологического института ФГБОУ ВО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова".

***+7 9039925120
vnh@u-sonic.ru***

Реализация ультразвукового воздействия

Волна-М УЗТА-1/22-ОМ

вода

растительное

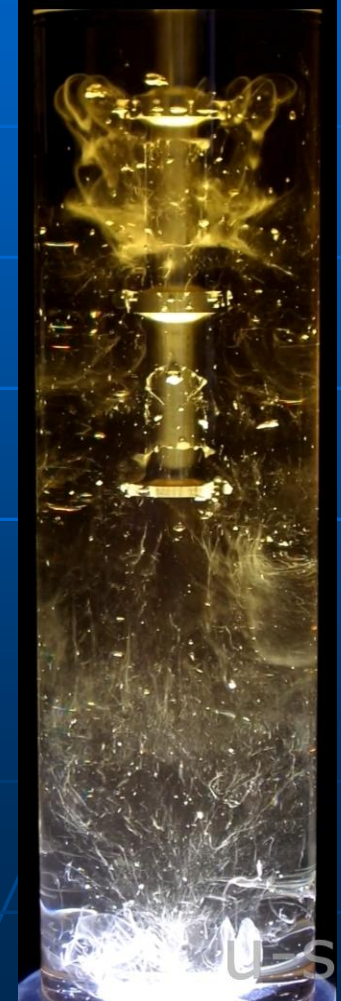
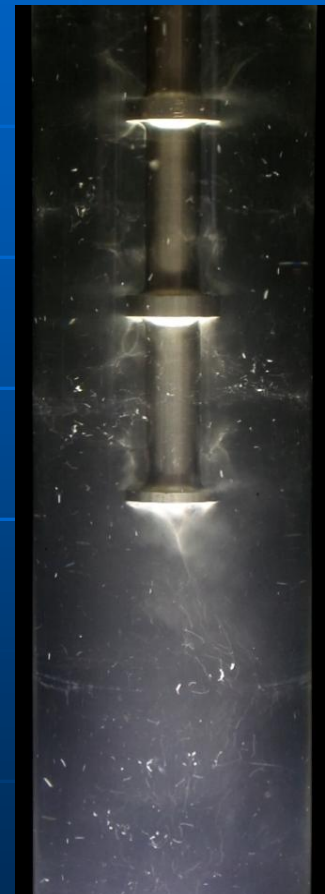
масло

Булава УЗТА-2/18-О

вода

растительное

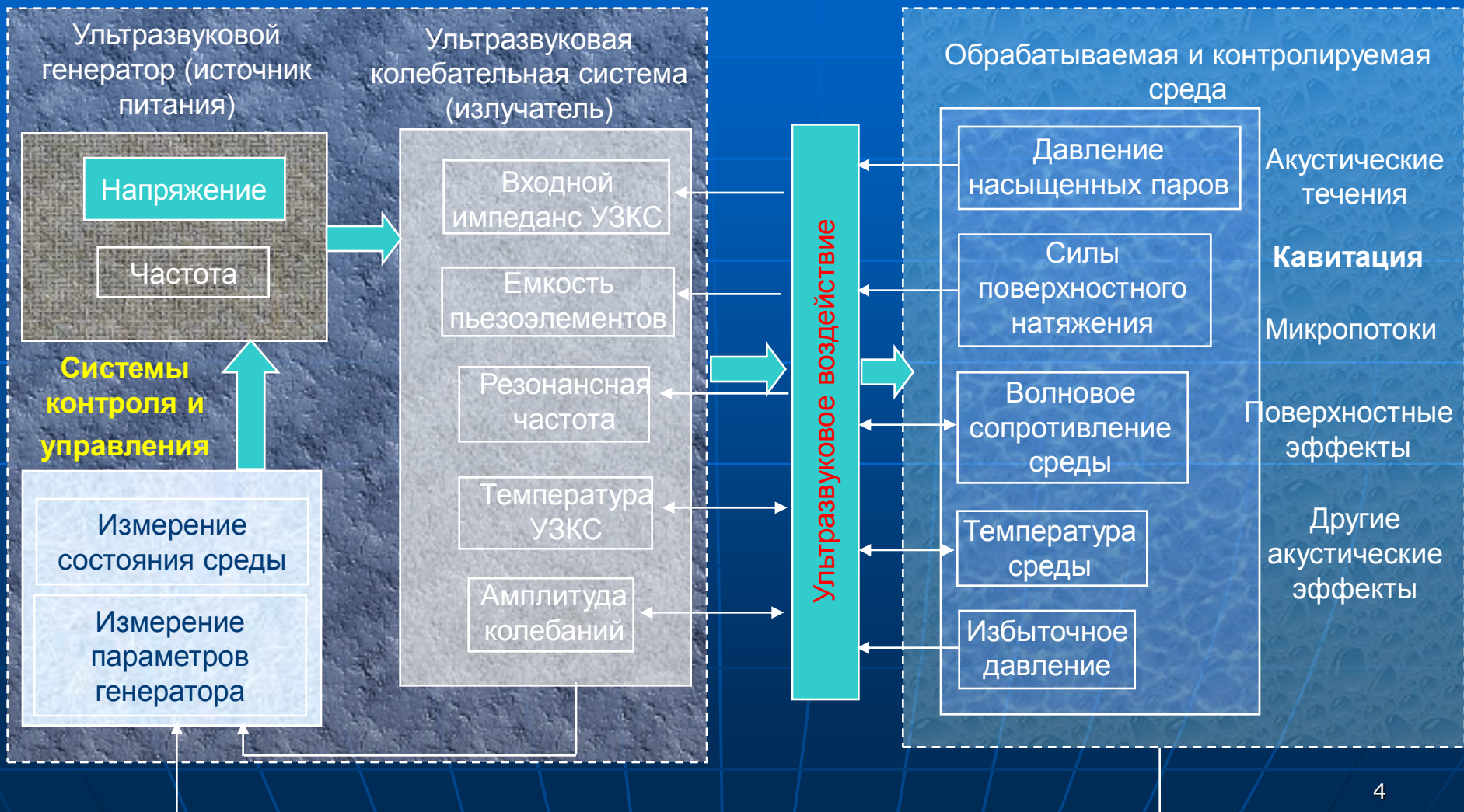
масло



Реализация ультразвукового воздействия

Ультразвуковой технологический аппарат

Технологический процесс



Экстремальные условия для ультразвукового воздействия

Низкие температуры
(-150...-50 °C)

Высокие температуры
(+200...+1000 °C)

Во всех случаях ультразвуковое
воздействие может осуществляться
на жидкие, твёрдые и газообразные
среды

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выявление оптимальных режимов ультразвукового воздействия в экстремальных условиях

- исследование кавитации в сплошной жидкой фазе с учётом фазовых переходов и вязкоупругости среды;
- исследование влияния ультразвука на процессы разрушения твёрдых материалов в экстремальных условиях;
- исследование влияния ультразвука на динамику гетерогенных систем со сплошной газовой фазой при экстремально высоких температурах

Практическая реализация оптимальных режимов ультразвукового воздействия в экстремальных условиях

- исследование электрических свойств пьезоэлектрической колебательной системы при экстремально высоких или низких температурах;
- разработка системы поддержания температуры первичного пьезопреобразования в рабочем диапазоне;
- контроль параметров ультразвуковой колебательной системы при изменяющихся внешних условиях;
- контроль параметров ультразвуковой колебательной системы при изменяющихся свойствах среды

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

- Воздействие на жидкие среды**
- Воздействие на твёрдые среды**
- Воздействие на газообразные среды**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ В ЖИДКОСТИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

МОДЕЛЬ РАСШИРЕНИЯ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= 4\pi K R_B^2 \frac{p_{sat} - p_v}{p_v} \\ \frac{dR_B}{dt} &= \frac{C(t)}{R_B^2} + \frac{K}{\rho} \frac{p_{sat} - p_v}{p_v} \\ \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{R_B^2}{r^2} \frac{dR_B}{dt} \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{s}{\tau} &= - \frac{4R_B^2}{r^3 \tau} \mu \\ \frac{dC(t)}{dt} &= \frac{C^2(t)}{2r^3} + \\ &+ \frac{r}{\rho} \left(\frac{R_B(0)}{R_B(t)} (p_0 - p_v(0)) + p_v(t) - p_\infty + N[s] \right) \end{aligned} \right.$$

$$s = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_n(t)}{r^{3n}} - \text{радиальная компонента тензора вязких}$$

напряжений в жидкости, окружающей кавитационный пузырьёк (учитывается вязкоупругость)

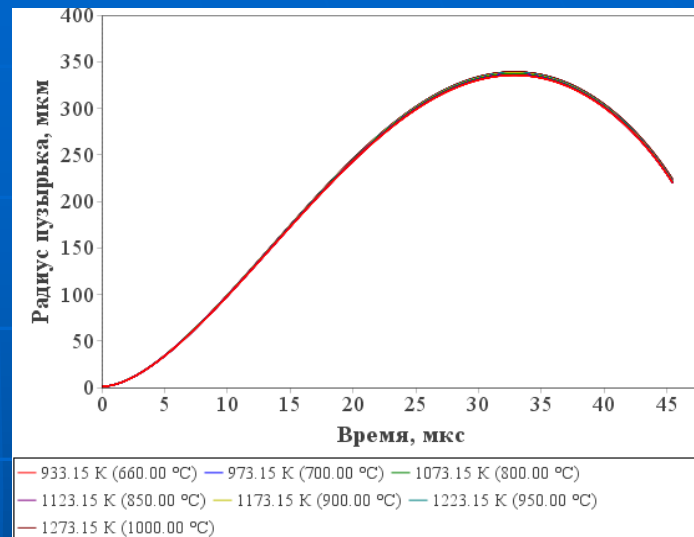
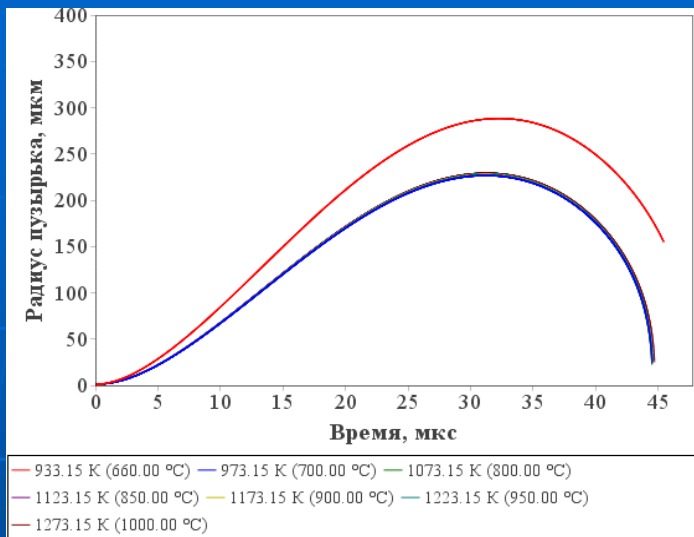
$$A_0(t) \equiv 0; \text{ для } n \geq 1$$

$$A_n(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \int_0^t e^{\frac{t_1}{\tau}} R_B^2(t_1) \frac{dR_B}{dt}(t_1) \left(-\delta_{1n} \frac{4\mu}{\tau} + 3(n-1)A_{n-1}(t_1) \right) dt_1;$$

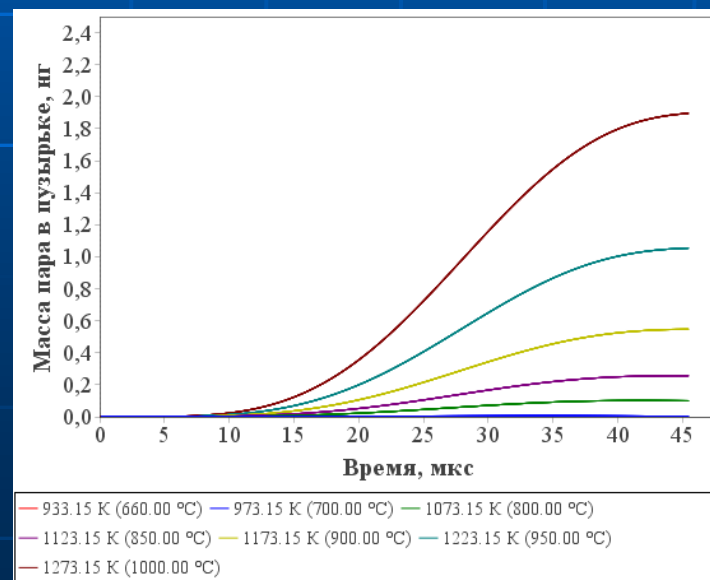
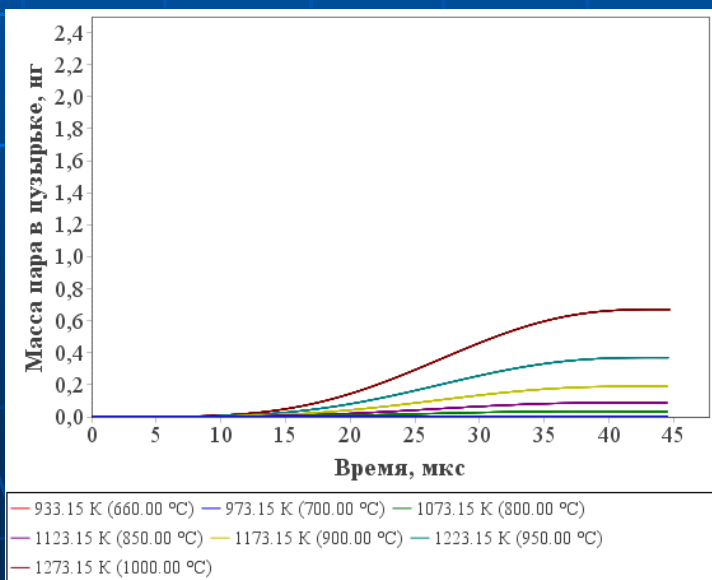
R_B – радиус пузырька; m – масса пара внутри пузырька; K – коэффициент, зависящий от удельной теплоты парообразования и гидродинамических условий на стенке пузырька; p_{sat} – давление насыщенного пара жидкости; p_v – давление пара внутри пузырька; $N[s]$ – вязкие напряжения на стенке пузырька, зависящие от s ; τ – время релаксации напряжений в жидкости за счёт вязкоупругости; μ – динамическая вязкость жидкости.

ПАРАМЕТРЫ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ (РАСПЛАВ АЛЮМИНИЯ)

Радиус пузырька



Масса пара внутри пузырька



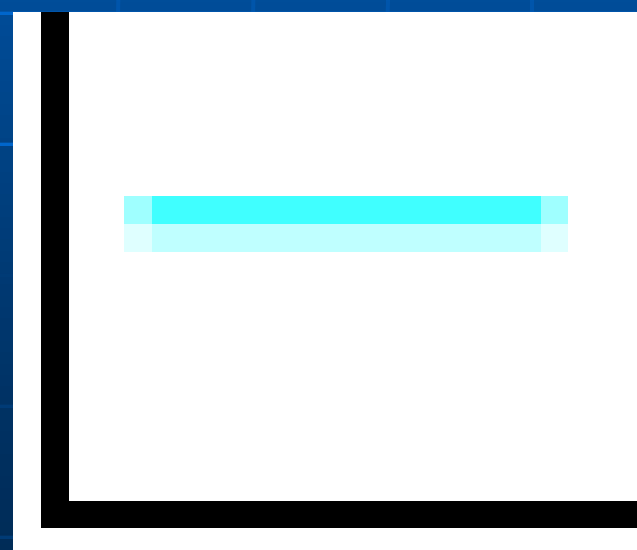
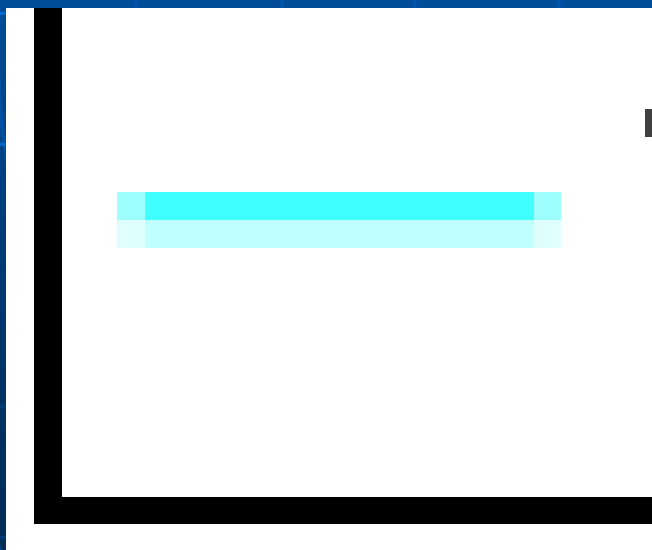
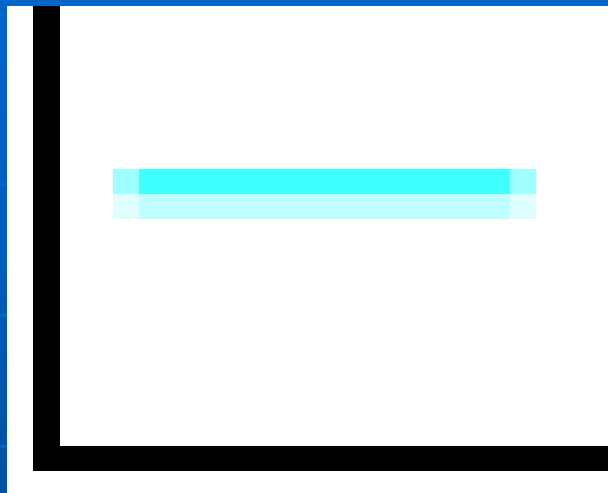
а) интенсивность 2,5 Вт/см²

б) интенсивность 4 Вт/см²

ПАРАМЕТРЫ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ (ЖИДКИЙ АЗОТ)

Радиус пузырька

Масса пара внутри пузырька



а) интенсивность 2 Вт/см²

б) интенсивность 4 Вт/см²

МОДЕЛЬ КОАЛЕСЦЕНЦИИ И ДРОБЛЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ В АНСАМБЛЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ

Факторы, влияющие на концентрацию кавитационных пузырьков

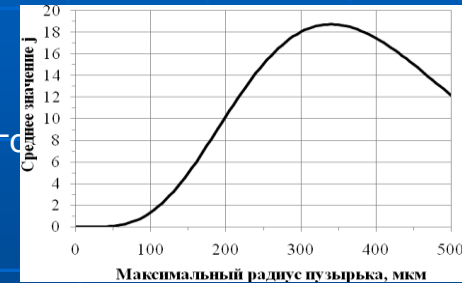
Коалесценция пузырьков за счёт сил Бьеркнеса

Уравнение для процесса сближения пузырьков под действием сил Бьеркнеса, приводящего к их коалесценции

$$\frac{4\pi R_0^3}{3} \rho_G \frac{\partial^2 \mathbf{d}_{12}}{\partial t^2} = -2 \frac{4\pi R^3}{3 |\mathbf{d}_{12}|^3} \rho_L \left(R^2 \frac{\partial R}{\partial t} \right) \frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{4\pi R^3}{3} \rho_L \left(-\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right) \right) + 4\pi \eta R \left(-\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right)$$

Дробление пузырьков при схлопывании

Зависимость числа зародышей, образуемых при дроблении отдельного пузырька от его максимального радиуса (при н.у.)



Уравнение Кирквуда-Бете

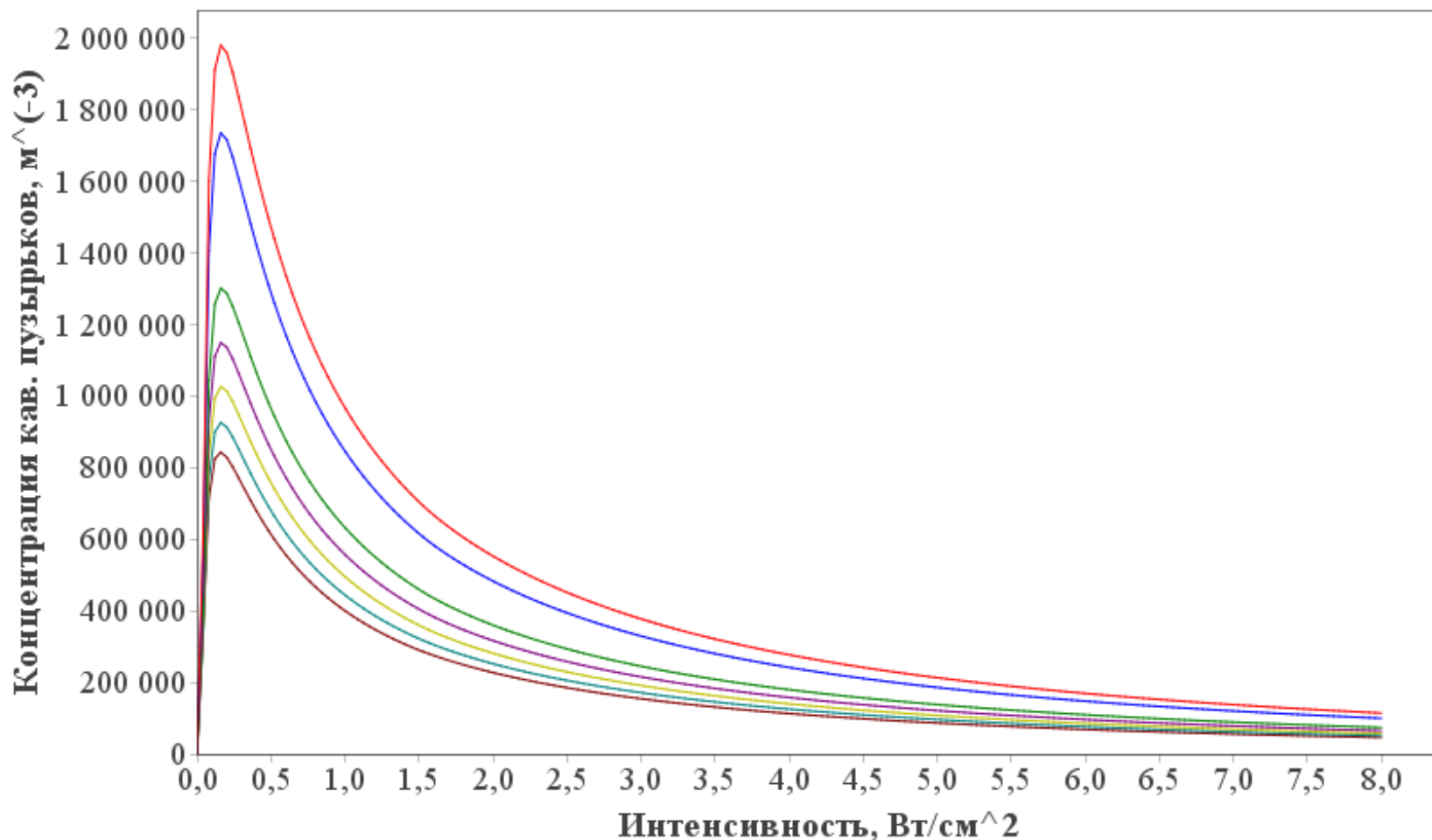
$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 \left(1 - \frac{\partial R}{3C} \right) = H \left(1 + \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \frac{R}{C} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right)$$

Концентрация пузырьков

$$n_\infty = \frac{2(j-1)}{25\pi R^2 |\mathbf{d}_{12}|^2 \rho_L \left(R^2 \frac{\partial R}{\partial t} \right)}$$

n_∞ – стационарная концентрация кавитационных пузырьков, м⁻³; j – количество зародышей, образуемых при дроблении отдельного пузырька; i – целое число периодов УЗ колебаний, прошедших с момента начального расширения пузырька до момента схлопывания; $R(t)$ – мгновенный радиус отдельного кавитационного пузырька, м; \mathbf{d}_{12} – вектор линии центров пары кавитационных пузырьков, м; ρ_L – равновесная плотность сплошной жидкости, кг/м³; H – энтальпия жидкой фазы, м²/с²; C – локальная скорость звука в жидкости, м/с; ρ_G – плотность газа внутри пузырька, кг/м³; r – расстояние между наблюдаемой точкой и центром кавитационного пузырька, м

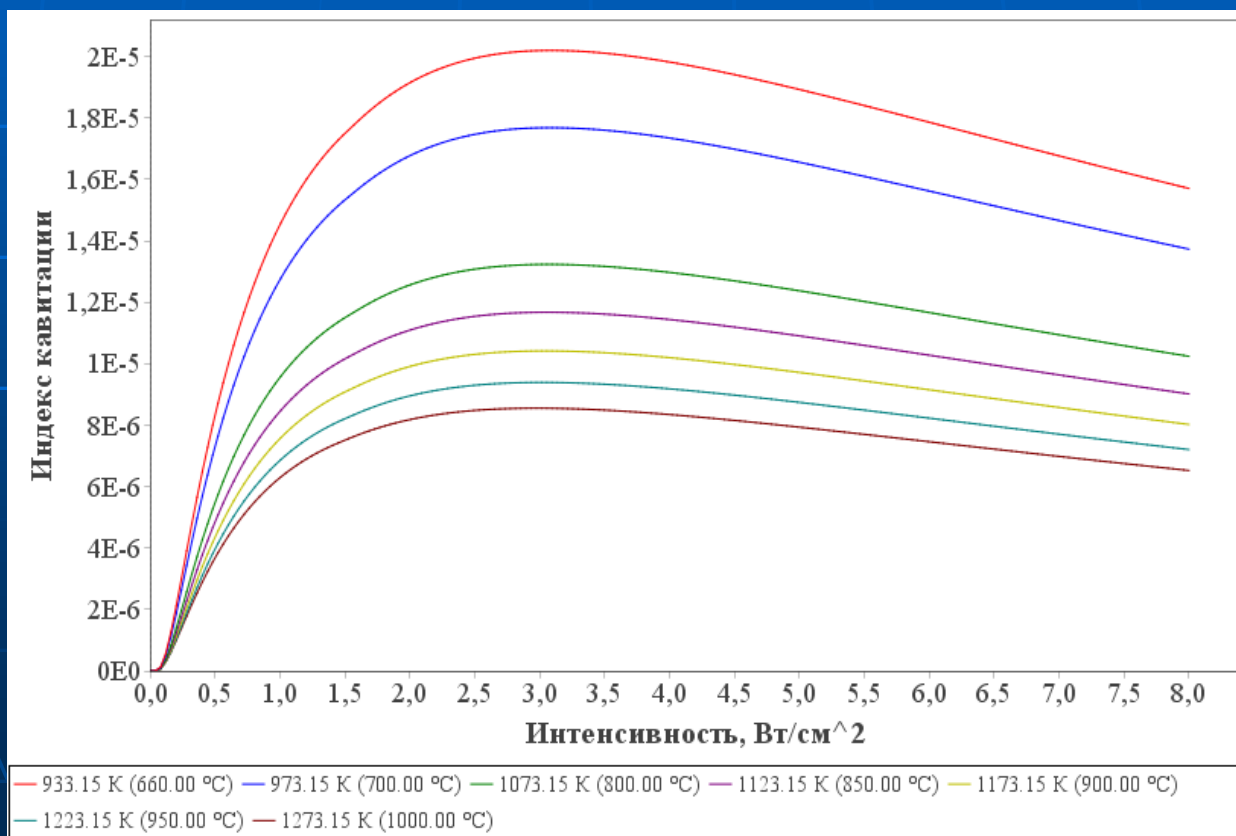
ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОЛЕБАНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ



— 933.15 K (660.00 °C) — 973.15 K (700.00 °C) — 1073.15 K (800.00 °C) — 1123.15 K (850.00 °C) — 1173.15 K (900.00 °C)
— 1223.15 K (950.00 °C) — 1273.15 K (1000.00 °C)

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОЛЕБАНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОБЪЁМНОЕ СОДЕРЖАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ (ИНДЕКС КАВИТАЦИИ)

$$\langle \delta \rangle = \left\langle \frac{4}{3} \pi R^3 \langle \dot{n}_{bub} \rangle \right\rangle$$



МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ В СЛОЕ ЖИДКОСТИ

$$\frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = \rho_l \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2}$$

p – возмущение звукового давления в жидкости, Па;
 c_l – скорость звука в сплошной жидкости, м/с;
 ρ_l – плотность сплошной жидкости, кг/м³; δ –
 объёмное содержание кавитационных пузырьков

$$P_1 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\omega} p \overleftarrow{e^{i\omega t}} dt; \quad \delta_1 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\omega} \delta \overleftarrow{e^{i\omega t}} dt; \quad P_{-1} = P_1^*; \quad \delta_{-1} = \delta_1^*$$

$$-\frac{\omega^2}{c_l^2} P_1 - \Delta P_1 = -\omega^2 \rho_l \frac{\delta_1 \overleftarrow{P_1}}{P_1} \rightarrow -\frac{\omega^2}{c_l^2} P_1 - \Delta P_1 = -\omega^2 \rho_l \left[\kappa_{1\text{Re}} |P_1| + i \kappa_{1\text{Im}} |P_1| \right] \overleftarrow{P_1}$$

МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ В 3D-ОБЛАСТИ

$$P_1^{(q+1)} = -\omega^2 \rho_l \left[\kappa_{1\text{Re}} |P_1^{(q)}| + i \kappa_{1\text{Im}} |P_1^{(q)}| \right] \overleftarrow{P_1^{(q)}} \left(-\frac{\omega^2}{c_l^2} + \omega^2 \rho_l \kappa_{1\infty} - \Delta \right)^{-1} P_1^{(q)}$$

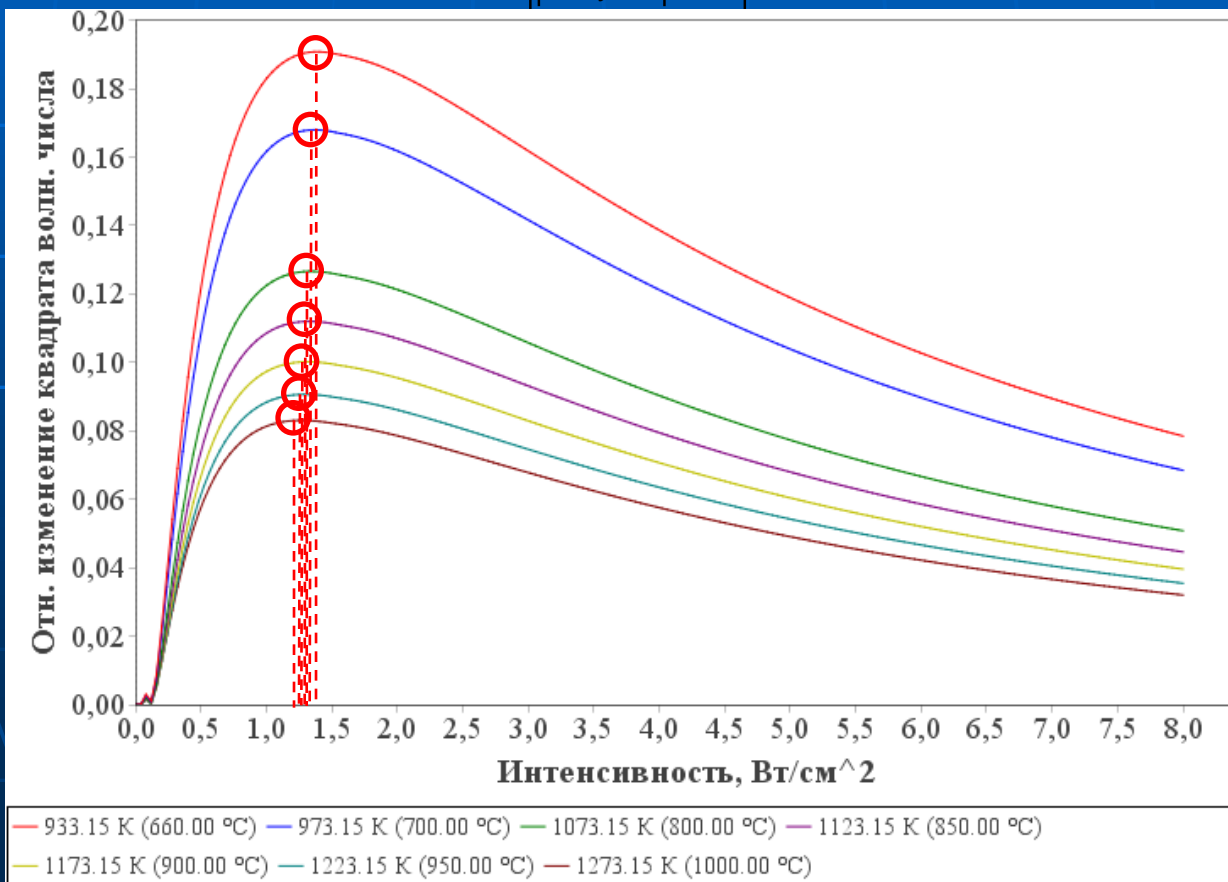
Выбор $\kappa_{1\infty}$ таким образом, что

$$\|P_1^{(q+1)} - Q_1^{(q+1)}\| \leq q \|P_1^{(q)} - Q_1^{(q)}\|; \quad q < 1$$

ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКОСТИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОЛЕБАНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВОЛНОВОЕ ЧИСЛО КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ (РАСПЛАВ АЛЮМИНИЯ)

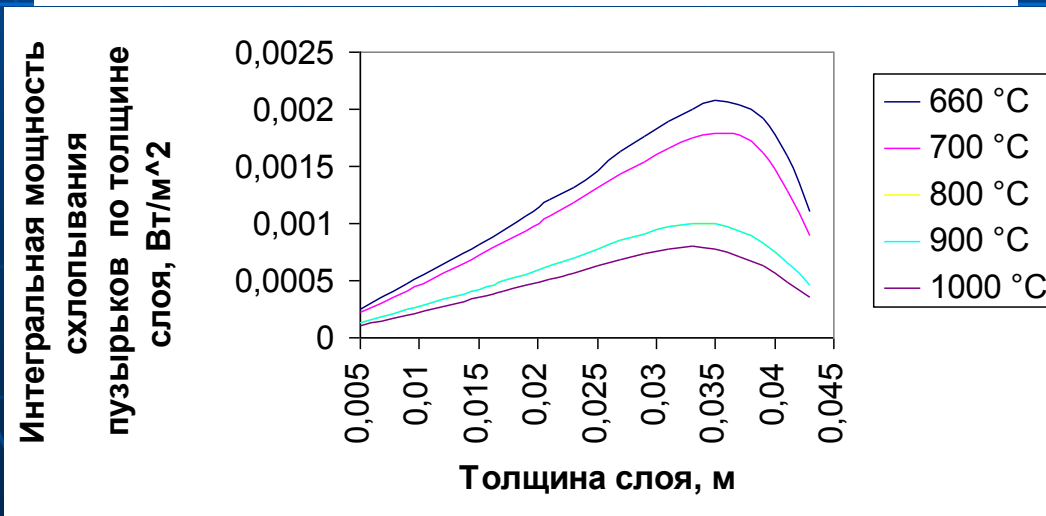
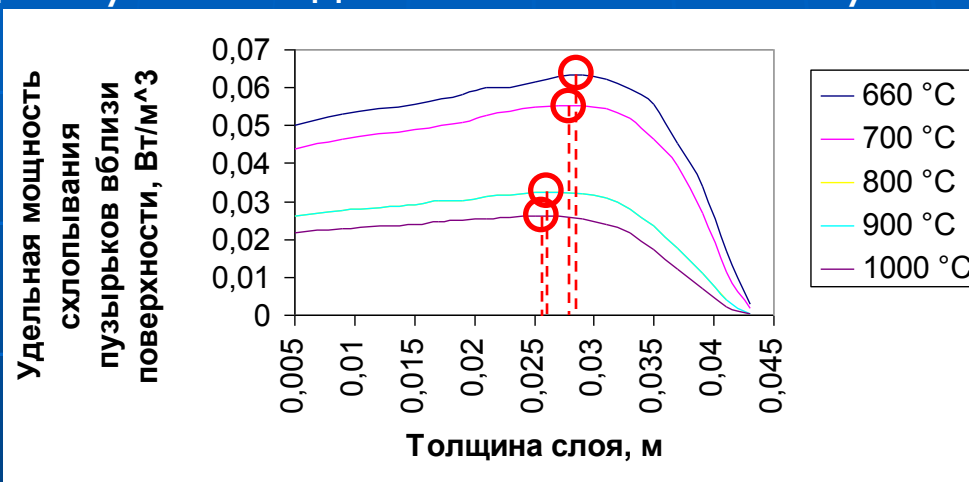
$$\left| \frac{k_{cav}^2}{k_l^2} - 1 \right|$$



ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКОСТИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ЭНЕРГЕТИКУ СХЛОПЫВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Амплитуда звукового давления вблизи излучателя – 500 кПа

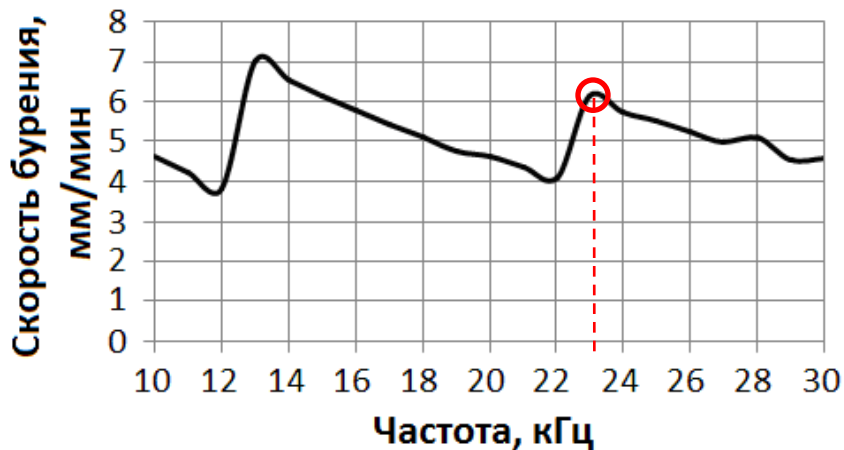
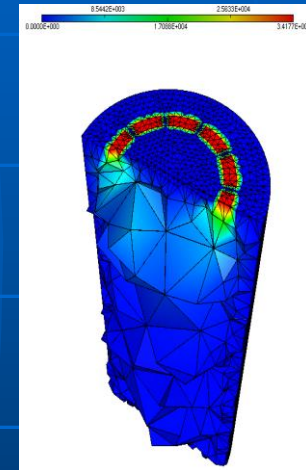
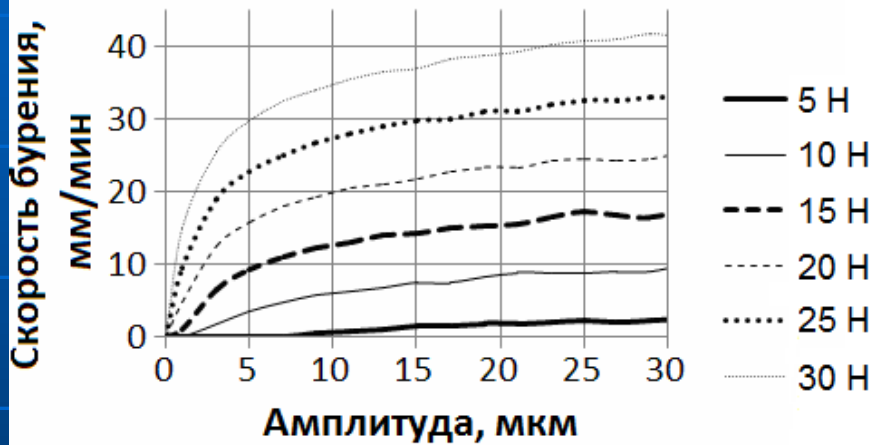


ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАВИТАЦИИ В ЖИДКОСТИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

- кавитацию возможно и необходимо создавать в жидкостях при широком диапазоне экстремальных температур - от температур криогенных жидкостей (в обычных условиях это газы) до температур плавления металлов
- при экстремальных температурах необходимо обеспечить интенсивности воздействия не ниже, чем интенсивности при обычных температурах (необходимы новые рабочие инструменты из новых материалов)
- из-за сниженной интенсивности кавитации (начальная концентрация пузырьков ниже) необходима разработка более высокочувствительной системы контроля свойств среды, способной подбирать оптимальную интенсивность при изменяющейся температуре
- необходимо обеспечивать оптимальное расстояние между излучателем и отражающей поверхностью, которое зависит от температуры

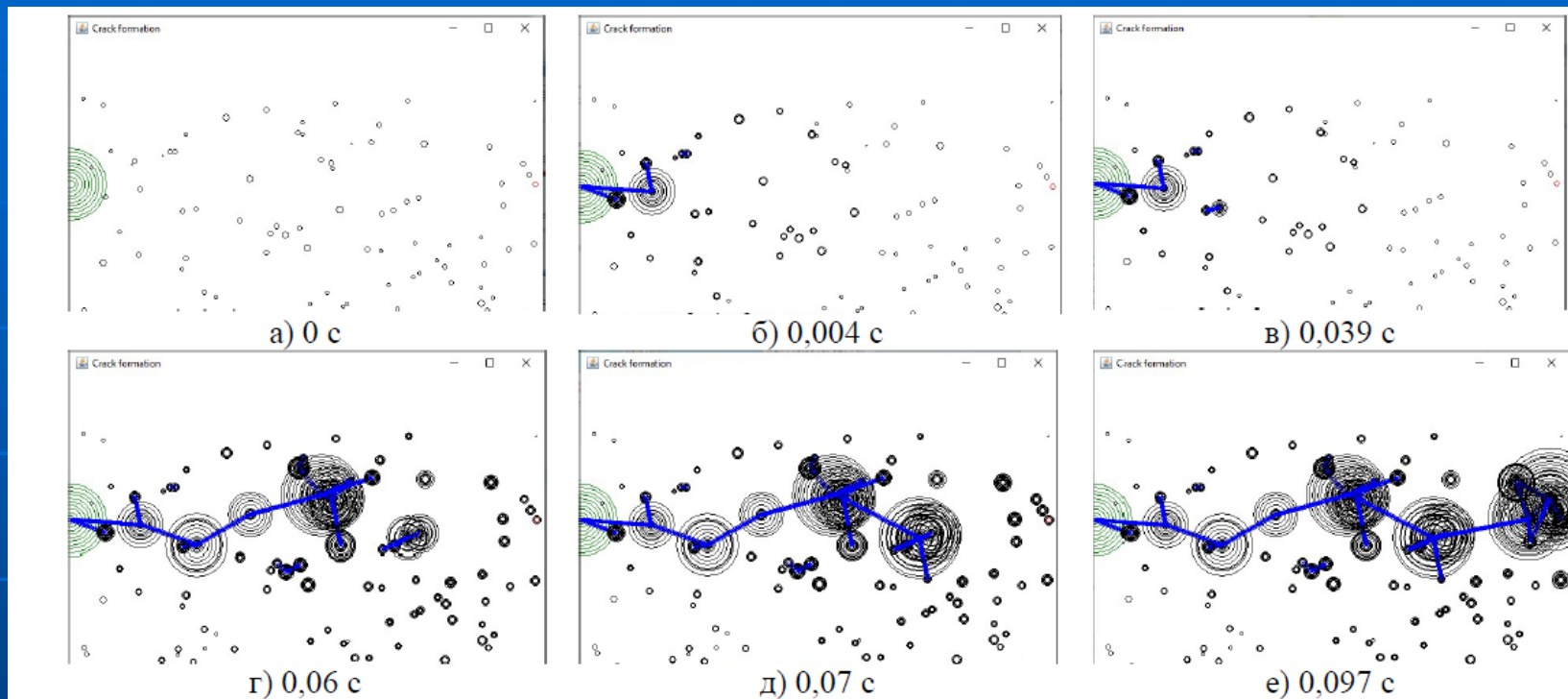
СКОРОСТЬ БУРЕНИЯ ТВЁРДОГО МАТЕРИАЛА И ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ПОР МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЁРДОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

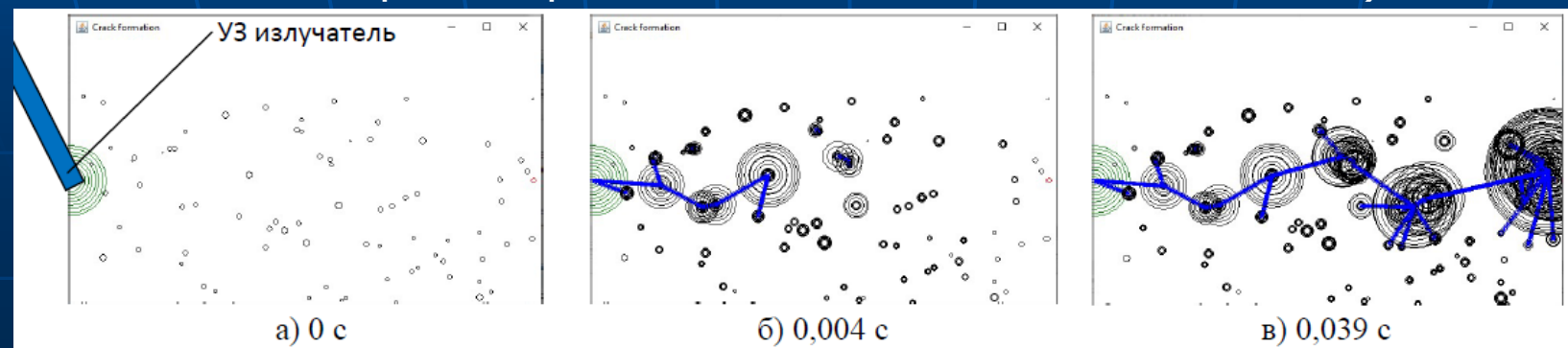


ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ МИКРОТРЕЩИН В ТВЁРДОМ ГРУНТЕ

Классическое ультразвуковое воздействие

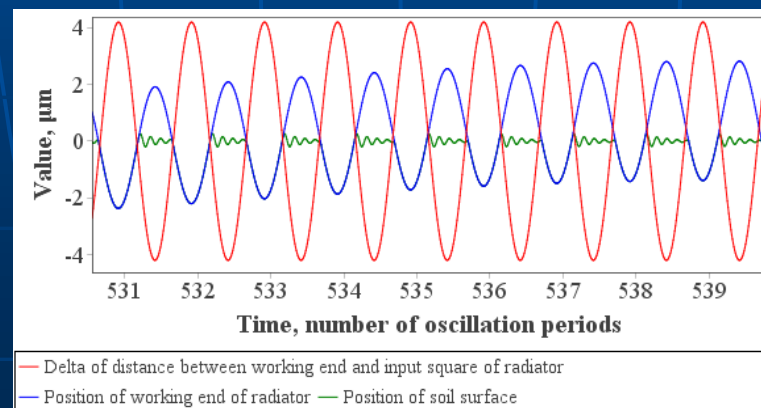
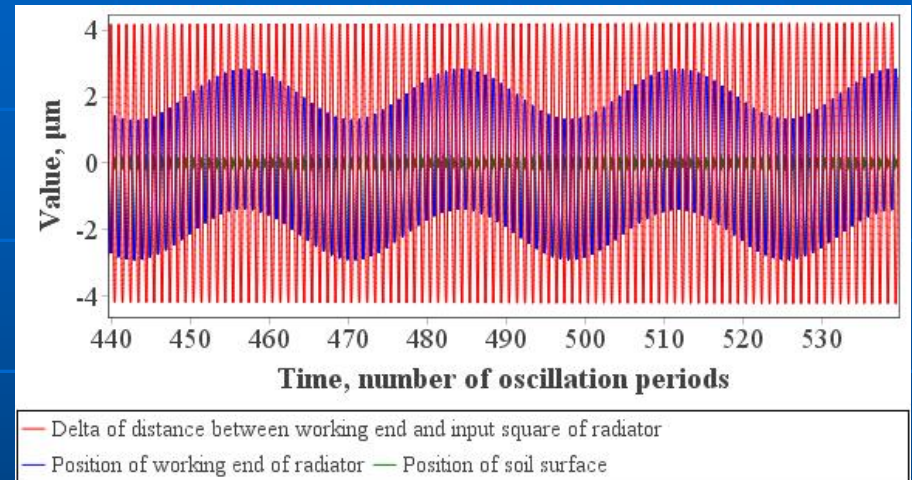
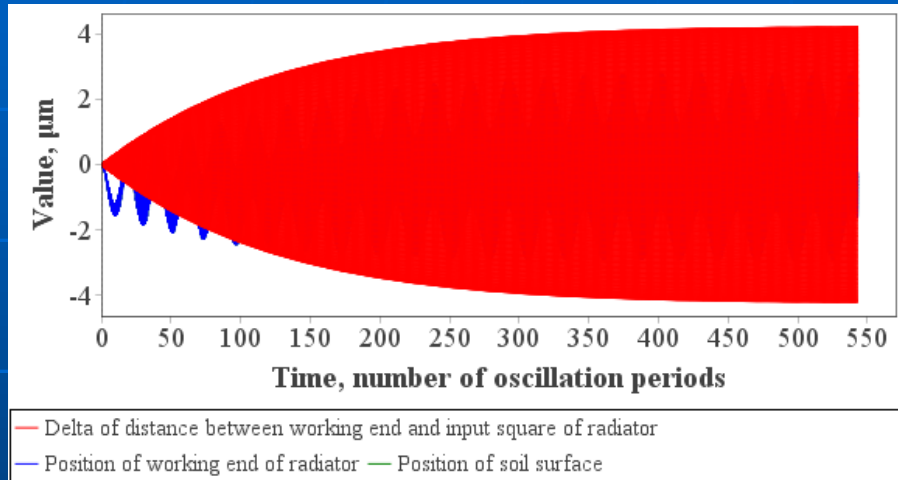


Ультразвуковое воздействие с низкочастотными ударами (со стороны присоединённой свободной массы)

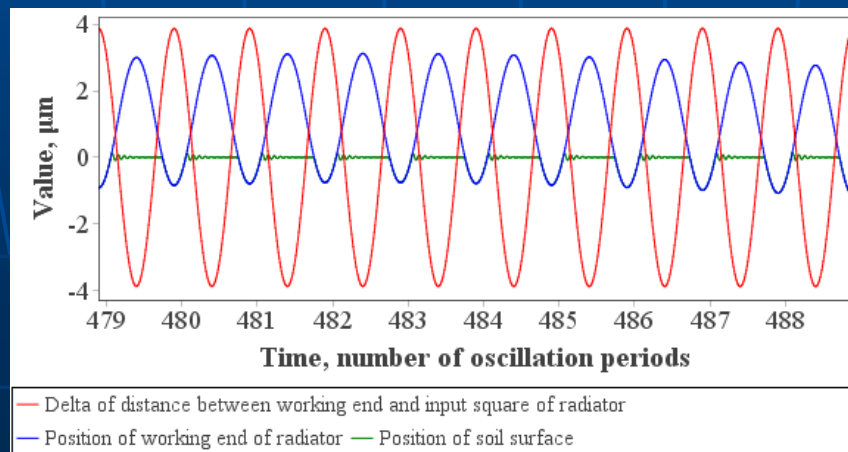
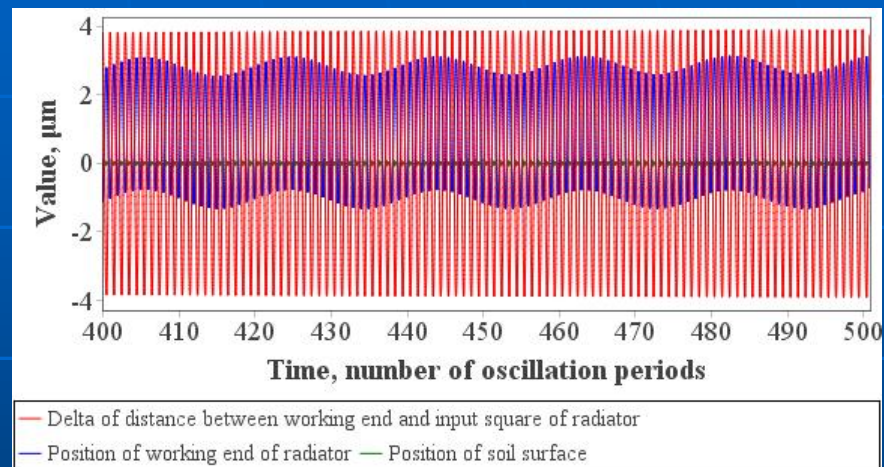
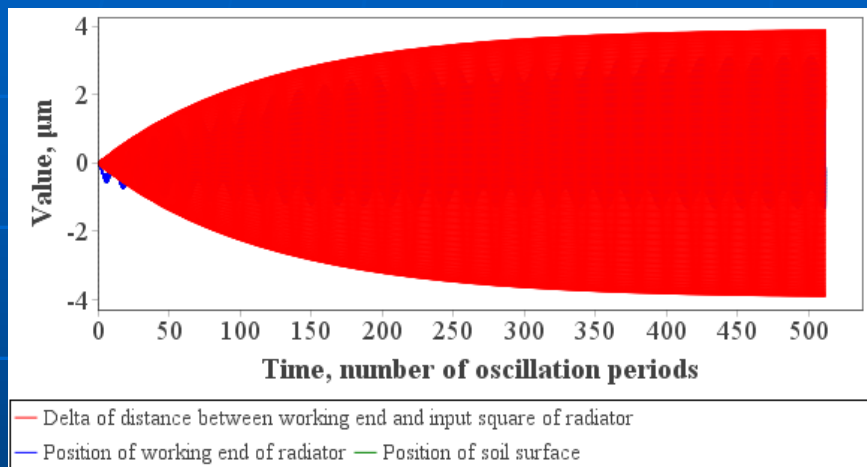


ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛОГРАММЫ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОЖЕНИЙ РАБОЧЕГО ОКОНЧАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ТВЁРДОГО ГРУНТА

(Модуль упругости грунта $1 \cdot 10^{10}$ Па)

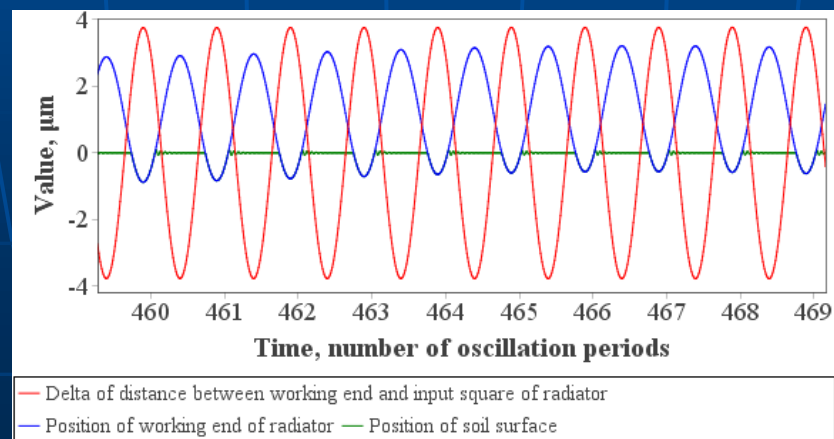
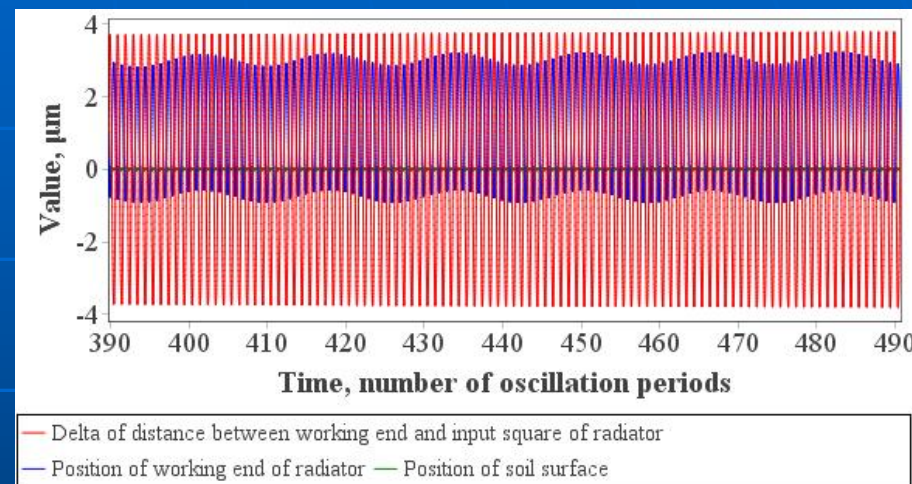
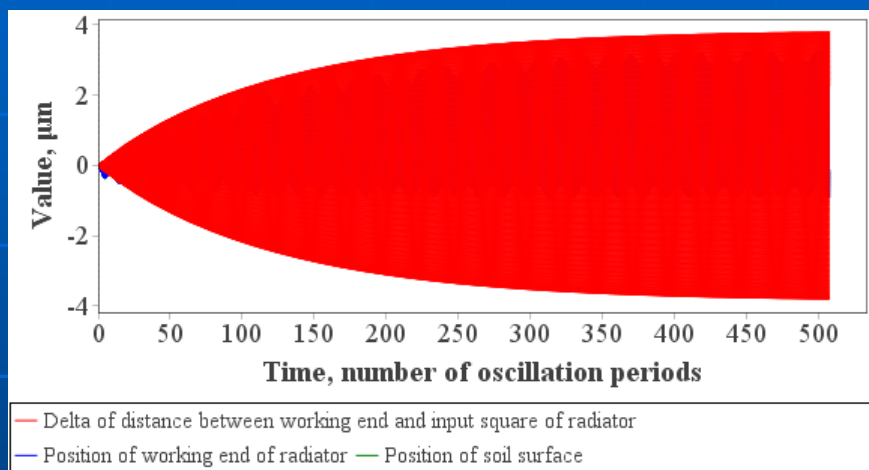


ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛОГРАММЫ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОЖЕНИЙ РАБОЧЕГО ОКОНЧАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ТВЁРДОГО ГРУНТА (Модуль упругости грунта $3 \cdot 10^{10}$ Па)



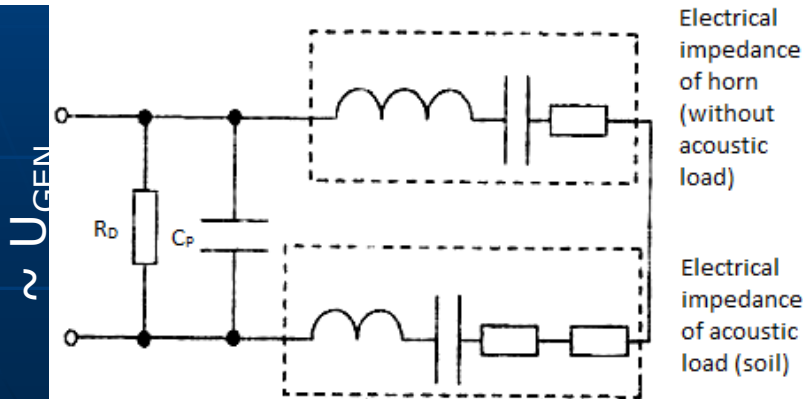
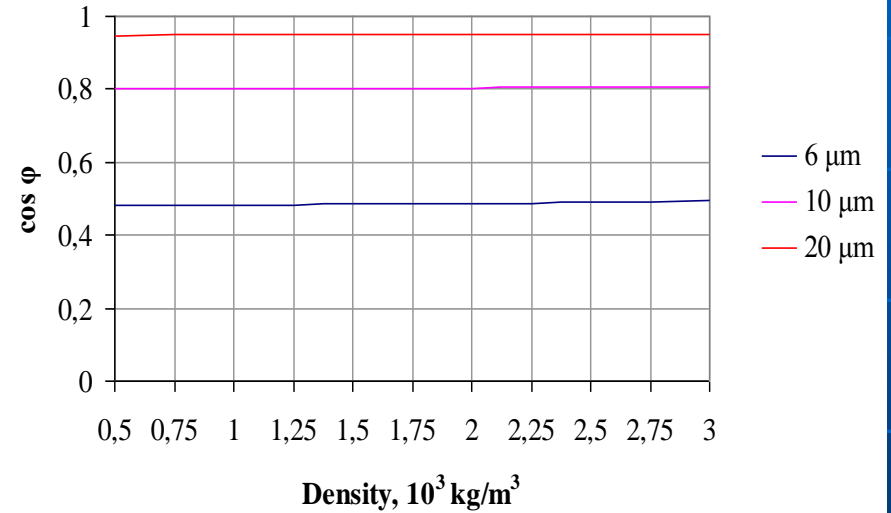
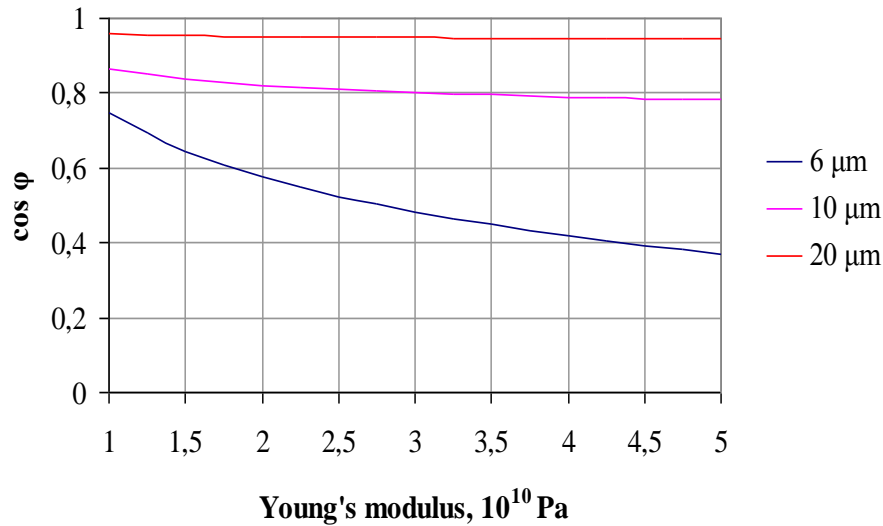
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛОГРАММЫ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОЖЕНИЙ РАБОЧЕГО ОКОНЧАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ТВЁРДОГО ГРУНТА

(Модуль упругости грунта $5 \cdot 10^{10}$ Па)



РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА ТВЁРДОГО ГРУНТА

$$Z_M = \frac{iF_A}{\frac{2}{T_\Omega} \int_0^{T_\Omega} \frac{dy}{dt} e^{i\omega t} dt} = |Z| \exp(-i\varphi)$$



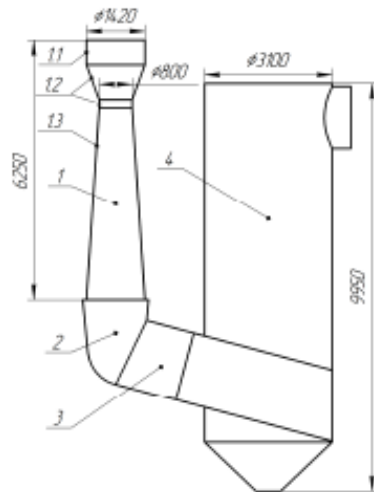
$$Z_E = \beta Z_M$$

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ТВЁРДЫЙ ГРУНТ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

- необходимо обеспечивать оптимальную амплитуду колебаний при УЗ бурении для достижения максимальной сохранности воды и других летучих веществ
- необходимо воздействовать на резонансной частоте, характерной для данного типа грунта
- частоту и оптимальную амплитуду необходимо обеспечить с учётом низкотемпературных условий, в которых будет находиться УЗ излучатель
- низкочастотное ударное воздействие со стороны присоединённой свободной массы дополнительно увеличивает скорость бурения
- свойство грунта, которое наиболее существенно влияет на косинус угла сдвига фаз между усилием и скоростью – модуль упругости
- для определения типа грунта целесообразно измерять косинус угла сдвига фаз механического импеданса системы «излучатель-грунт» и на основании расчётной зависимости определять модуль упругости (механический импеданс определяется по электрическим параметрам излучателя, **не используя внешних датчиков**)
- для определения типа грунта необходимо воздействовать с как можно меньшей амплитудой, чтобы не возникло процессов разрушения (не более 6 мкм)

ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

МОДЕЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ ДЛЯ РАСЧЁТА МОКРОГО ПЫЛЕУВАЛИВАНИЯ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ



- 1 – труба Вентури; 1.1 – оголовок;
 1.2 – конфузор с горловиной;
 1.3 – диффузор; 2 – колено;
 3 – соединительный патрубок;
 4 – каплеуловитель

Эскиз расчетной области
 скруббера Вентури

Исходные расчетные данные

Параметр	Значение
Несущая среда:	воздух
Температура на входе, °С	170
Расход, $10^3 \cdot \text{м}^3/\text{ч}$	100
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,78
Твердая дисперсная фаза:	зола
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1000
Размер частиц, мкм	2 – 90
Начальная концентрация, $\text{г}/\text{нм}^3$	17
Жидкая дисперсная фаза	вода
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1000
Массовый расход на входе, т/ч	10
Размер капель, мкм	150

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ И КОАГУЛЯЦИИ В СКРУББЕРЕ ВЕНТУРИ

$$m_p \frac{d\bar{v}_p}{dt} = 3\pi\mu d C_{cor} (\bar{v}_f - \bar{v}_p) + \frac{\pi d^3 \rho_f}{6} \frac{d\bar{v}_f}{dt} + \frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \left(\frac{d\bar{v}_f}{dt} - \frac{d\bar{v}_p}{dt} \right) - \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}) - \frac{\pi d^3}{6} \rho_p (\bar{\omega} \times \bar{v}_p) + \bar{F}_e, \quad (1)$$

где $m_p = \pi d^3 \rho_p / 6$, – масса частицы, кг; d – эквивалентный диаметр частицы, м; ρ_p – плотность частицы, кг/м³; ρ_f – плотность газа, кг/м³; \bar{v}_p – скорость частицы, м/с; \bar{v}_f – скорости газа, м/с; μ – динамическая вязкость газовой среды, Па·с; t – время, с; C_{cor} – коэффициент вязкого сопротивления со стороны основной фазы; $\bar{\omega}$ – угловая скорость вращения частицы, рад/с; \bar{r} – радиус-вектор; \bar{F}_e – дополнительная внешняя сила, действующая на частицу.

$$\bar{F}_e = \frac{4\pi\mu(W-1)^3}{W} \times \left(\frac{\cos^2 \theta}{(W^2-2)\arctg\sqrt{W^2-1}-\sqrt{W^2-1}} + \frac{\sin^2 \theta}{(3W^2-2)\arctg\sqrt{W^2-1}-\sqrt{W^2-1}} \right) \times \bar{U}(\bar{r}, t), \quad (2)$$

где d – наибольший диаметр эллипсоидальной частицы, м; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; W – отношение длины большей полуоси частицы к меньшей; θ – угол между меньшей полуосью частицы и направлением звукового поля, рад; \bar{U} – возмущение скорости газового потока, м/с, которое рассчитывается с учетом двух основных механизмов взаимодействия частиц в УЗ-поле (ортокинетики и гидродинамики) под действием сил Осеена с использованием выражений, описанных в работах G.X. Zhang, J.Zh. Liu:

$$\bar{U}(\bar{r}, t) = \left[\operatorname{Re} \left(\frac{\nabla P(\bar{r})}{i\omega\rho} \right) + \sum_{k=1}^N \left[\frac{3\nu R_k V_k (\bar{r}_k - \bar{r})}{2|V_k| |\bar{r}_k - \bar{r}|^3} \left[1 - e^{\frac{|\bar{r}_k - \bar{r}|}{2\nu} \left(|V_k| - V_k \left| \frac{(\bar{k}, \bar{r}_k - \bar{r})}{k|\bar{r}_k - \bar{r}|} \right| \right)} \right] \left[1 + \frac{|\bar{r}_k - \bar{r}|}{2\nu} \left(|V_k| + V_k \left| \frac{(\bar{k}, \bar{r}_k - \bar{r})}{k|\bar{r}_k - \bar{r}|} \right| \right) \right] \right] - \frac{3R_k V_k^2}{4|\bar{r}_k - \bar{r}| |V_k|} \sqrt{1 - \left| \frac{(\bar{k}, \bar{r}_k - \bar{r})}{k|\bar{r}_k - \bar{r}|} \right|^2} \cdot e^{\frac{|\bar{r}_k - \bar{r}|}{2\nu} \left(|V_k| - V_k \left| \frac{(\bar{k}, \bar{r}_k - \bar{r})}{k|\bar{r}_k - \bar{r}|} \right| \right)} e_{k\theta} \left(1 + \frac{3R_k |V_k|}{8\nu} \right) \cos \left(\omega t + \operatorname{Arg} \left(\frac{\nabla P(\bar{r})}{i\omega\rho} \right) \right), \quad (3)$$

где ω – угловая частота УЗ-волн, рад/с; t – время, с; φ – фазовый сдвиг колебательной скорости, рад; ρ – плотность газа, кг/м³; $P(\bar{r})$ – комплексная амплитуда звукового давления в газовой среде, Па; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с; R_k – радиус k -й соседней частицы, м; V_k – проекция скорости газа на волновой вектор УЗ-поля в месте расположения k -й частицы, м/с; \bar{r} – положение центра рассматриваемой частицы, м; \bar{r}_k – положение центра k -й соседней частицы, м; \bar{k} – волновой вектор УЗ-поля, м⁻¹; $e_{k\theta}$ – единичный вектор, перпендикулярный вектору $\bar{r}_k - \bar{r}$; N – количество k -х соседних частиц.

Расчет эффективности трубы Вентури и скруббера основан на вычислении массового расхода дисперсных частиц, проходящих через заданную выходную поверхность за время Δt :

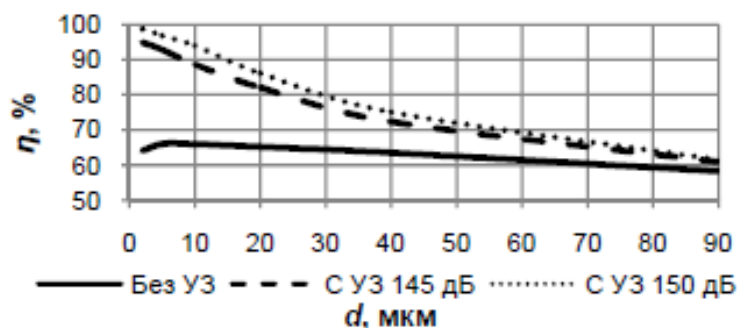
$$\eta = \frac{\rho_p \cdot \sum_{k=1}^{N(\Delta t)} H_{d_{min}}(d_k) \cdot \frac{\pi d_k^3}{6}}{\alpha_{вх} \cdot G \cdot \Delta t} \cdot 100\%,$$

где ρ_p – плотность частиц пыли, кг/м³; d_k – диаметр рассматриваемой частицы, м; $\alpha_{вх}$ – начальная запыленность газа на входе, кг/м³; G – расход газа, м³/с; $N(\Delta t)$ – число частиц, прошедших через выходное сечение за время Δt ; $H_{d_{min}}(d_k)$ – функция-индикатор типа частицы, равная 1 при $d_k < d_{min}$ и 0 при $d_k > d_{min}$; d_{min} – минимальный диаметр капель воды, м.

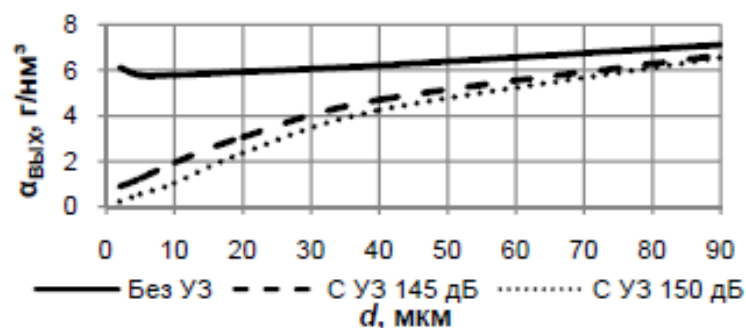
Остаточная запыленность газа на выходе рассчитывается по выражению:

$$\alpha_{вых} = \frac{(100 - \eta)}{100} \cdot \alpha_{вх}.$$

ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКРУББЕРА ВЕНТУРИ ОТ РАЗМЕРА УЛАВЛИВАЕМЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ (ЧАСТОТА 22 КГЦ)

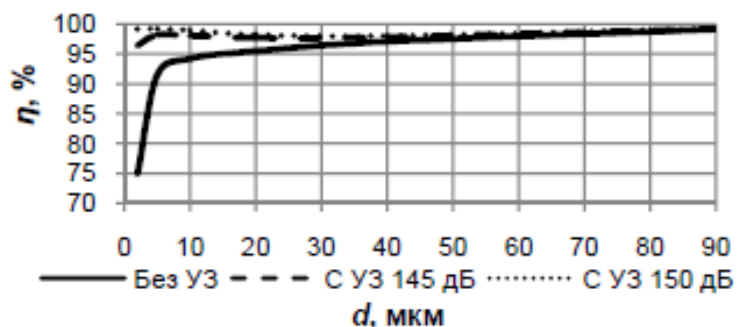


а)

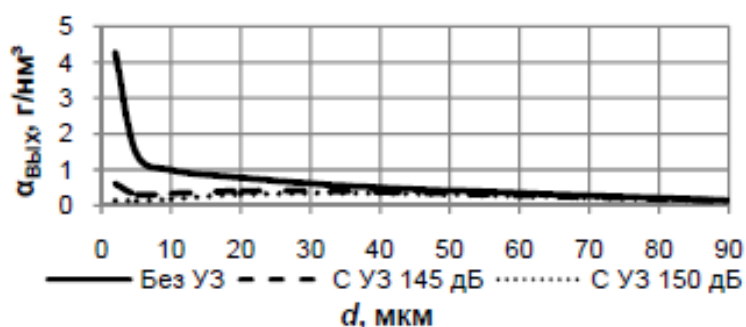


б)

Зависимость эффективности (а) и запыленности (б) на выходе трубы Вентури при различных уровнях звукового давления



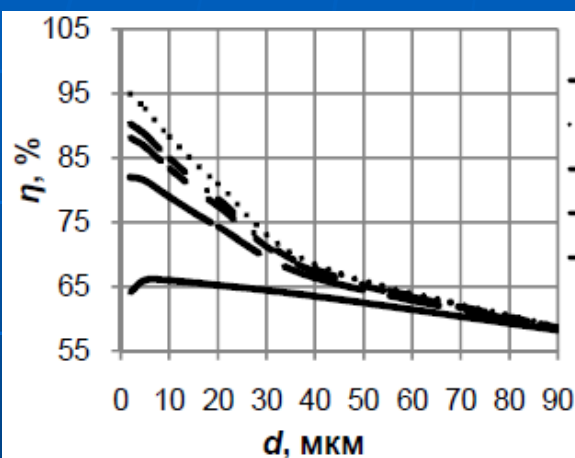
а)



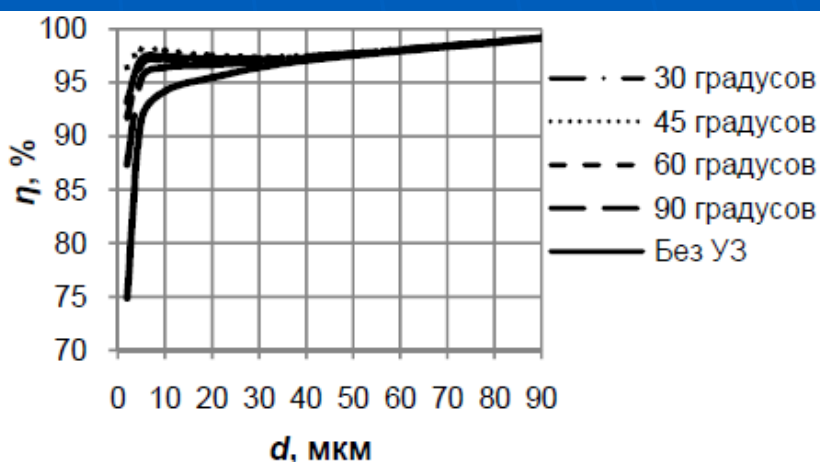
б)

Зависимость эффективности (а) и запыленности (б) на выходе скруббера при различных уровнях звукового давления

ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКРУББЕРА ВЕНТУРИ ОТ РАЗМЕРА УЛАВЛИВАЕМЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РАЗЛИЧНОМ КОЛИЧЕСТВЕ И УГЛАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ (К ОСИ ТРУБЫ ВЕНТУРИ) УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ



а)



б)

Зависимости эффективности трубы Вентури (а) и скруббера (б) при различных углах установки УЗ-излучателей в трубу Вентури

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ГАЗОДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

- необходимо обеспечивать уровень звукового давления не менее 150 дБ при температуре 170 градусов Цельсия
- необходимо устанавливать излучатели под оптимальным углом (45 градусов)
- необходимо обеспечить равномерное звуковое давление во всей области коагуляции

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К УЛЬТРАЗВУКОВЫМ АППАРАТАМ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

- необходимо обеспечивать интенсивности ультразвуковых колебаний, не ниже, чем для обычных условий (комнатная температура при атмосферном давлении) во всём объёме озвучиваемой среды
- из-за снижения предельных характеристик излучателей при экстремальных температурах необходимо увеличивать долю вводимой энергии колебаний в среду от излучателя за счёт оптимизации геометрии акустического тракта в озвучиваемой среде (оптимизация расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей; расположение излучателей под оптимальным углом к оси озвучиваемого объёма)
- необходимо реализовать высокочувствительную систему контроля типа озвучиваемой среды
- необходимо обеспечивать рабочий диапазон температур первичного пьезопреобразователя за счёт систем термостатирования и охлаждения
- необходимо использовать специальные материалы для изготовления рабочего окончания ультразвукового излучателя, способные выдержать амплитуды упругих колебаний ультразвуковой частоты, требуемые для обычных условий, в экстремальных условиях