

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ ПРИ РАЗМОТКЕ КОКОНОВ

Ботиров Алишер Ахмаджон ўғли  
Рахимов Акмал Алишеревич

Базовый докторант Наманганского инженерно-строительного института  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.20622386>

**Аннотация.** В статье рассмотрены теоретические основы и экспериментальное исследование динамики всплытия коконов в водяной ванне под действием ультразвука. На основе второго закона Ньютона построена математическая модель движения кокона, определены акустическая радиационная сила и стационарная высота всплытия. Экспериментальные измерения высоты всплытия, выполненные с помощью камеры и алгоритмов компьютерного зрения, подтвердили адекватность модели (погрешность  $\leq 4,3\%$ ). Установлено, что при частоте 40 кГц и суммарной мощности 600 Вт коконы поднимаются на 17,5 мм, что находится в безопасном диапазоне ( $h_{\max} = 30$  мм). Зависимость высоты всплытия от мощности описывается выражением  $h_s = 0,245 \cdot P^{2/3}$  ( $R^2 = 0,997$ ).

**Ключевые слова:** размотка коконов, ультразвук, акустическая радиационная сила, высота всплытия, гидродинамика, компьютерное зрение, фильтр Калмана, математическое моделирование.

### Введение.

Применение ультразвуковой кавитации позволяет размягчать слой серицина при пониженных температурах (40–60 °С) и существенно повысить эффективность размотки коконов. Однако при ультразвуковой обработке возникает специфическая проблема: под действием акустической радиационной силы коконы поднимаются от дна ванны к поверхности воды. Если высота всплытия становится чрезмерной, кокон выходит на поверхность, что приводит к обрыву шёлковой нити. Поэтому моделирование динамики всплытия коконов и экспериментальное определение её параметров являются необходимым условием проектирования системы автоматического управления процессом.

### Математическая модель движения кокона.

Баланс сил, действующих на кокон в водяной среде, описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка на основе второго закона Ньютона:

$$m \cdot (d^2h/dt^2) + c_d \cdot (dh/dt) + m \cdot g = F_{ак}(h) + \rho_v \cdot V_k \cdot g \quad (1)$$

где  $m = 0,8 \cdot 10^{-3}$  кг — средняя масса кокона;  $h(t)$  — высота подъёма центра кокона от дна ванны;  $c_d$  — коэффициент гидродинамического сопротивления (по Стоксу  $c_d = 6\pi\eta r_k$ );  $\rho_v = 998$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воды;  $V_k$  — объём кокона;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Акустическая радиационная сила для сферического тела определяется через градиент акустического давления и функцию Горькова  $\Phi(kr_k)$ :

$$F_{ак} = (4/3)\pi r_k^3 \cdot (\nabla P_a^2) / (2\rho_v \cdot c^2) \cdot \Phi(kr_k) \quad (2)$$

Зависимость акустической силы от высоты имеет вид экспоненциального затухания  $F_{ак}(h) = F_{ак}(0) \cdot \exp(-\alpha_a \cdot h)$ , что позволяет получить выражение для стационарной высоты всплытия:

$$h_s = (1/\alpha_a) \cdot \ln [ F_{ак}(0) / ((m - \rho_v \cdot V_k) \cdot g) ] \quad (3)$$

Полное решение уравнения (1) представляет собой затухающий колебательный процесс. Расчёт показал, что собственная частота системы  $\omega_n = 12,5$  рад/с, коэффициент демпфирования  $\zeta = 0,72$ ; кокон достигает стационарной высоты примерно за 0,5 с с перерегулированием менее 5%. Таким образом, переходный процесс является быстрым и устойчивым.

#### **Экспериментальное исследование высоты всплытия.**

Эксперимент проводился на прототипе мехатронной системы с водяной ванной из стали AISI 316L (50 л) и четырьмя пьезоэлектрическими генераторами PZT-4 (40 кГц). Высота всплытия коконов измерялась камерой Logitech C920 (1920×1080, 30 кадров/с), установленной под углом 45°. Идентификация коконов выполнялась алгоритмами компьютерного зрения (фильтр Гаусса, сегментация Оцу, отслеживание фильтром Калмана). Фильтр Калмана снизил стандартное отклонение измерений с  $\sigma = 1,8$  мм до  $\sigma = 0,4$  мм, то есть в 4,5 раза; точность измерения высоты составила  $\pm 0,5$  мм. Результаты показали, что при частоте 40 кГц коконы поднимаются до 17,5 мм и достигают стационарного положения примерно за 30 с, что хорошо согласуется с теоретической моделью. При 50 кГц высота достигает 24,5 мм (вблизи опасной границы), а при 60 кГц снижается до 19,8 мм вследствие уменьшения эффективности кавитации. Сравнение теоретических и экспериментальных значений дало максимальную погрешность 4,3% (при 20 кГц) и минимальную 1,7% (при 40 кГц), что подтверждает адекватность модели.

#### **Влияние мощности и температуры.**

Влияние мощности ультразвука исследовалось при частоте 40 кГц в диапазоне 150–900 Вт. Установлено, что при 600 Вт высота всплытия  $h_s = 17,5$  мм составляет 58,3% от предельного значения  $h_{max} = 30$  мм — это оптимальный режим. При 750 Вт высота возрастает до 22,0 мм (73,3%), а при 900 Вт — до 27,5 мм (91,7%), что соответствует опасной зоне. Зависимость высоты всплытия от мощности аппроксимируется эмпирическим выражением:

$$h_s = \alpha \cdot P^{(2/3)}, \quad \alpha = 0,245 \text{ мм/Вт}^{(2/3)}, \quad R^2 = 0,997 \quad (4)$$

Влияние температуры на высоту всплытия оказалось незначительным: при изменении температуры от 30 до 90 °С высота изменялась всего на 8,3% (с 16,8 до 18,2 мм). Следовательно, определяющими факторами высоты всплытия являются частота и мощность ультразвука, а не температура. Этот вывод важен при проектировании контура управления: высоту всплытия целесообразно регулировать именно мощностью генераторов.

#### **Заключение.**

Построенная на основе второго закона Ньютона математическая модель движения кокона, учитывающая акустическую радиационную силу и гидродинамическое сопротивление, адекватно описывает динамику всплытия коконов (погрешность  $\leq 4,3\%$ ). Установлено, что оптимальным является режим 40 кГц при суммарной мощности 600 Вт, обеспечивающий стационарную высоту всплытия 17,5 мм в пределах безопасного диапазона. Зависимость высоты от мощности подчиняется закону  $h_s = 0,245 \cdot P^{(2/3)}$  ( $R^2 = 0,997$ ), а влияние температуры пренебрежимо мало. Полученные результаты служат теоретической и экспериментальной основой для проектирования системы автоматического управления, предотвращающей выход коконов на поверхность воды и связанные с этим обрывы шёлковой нити.

**Adabiyotlar, References, Литературы:**

1. Leighton T.G. The Acoustic Bubble. – London: Academic Press, 1994. – 613 p.
2. Neppiras E.A. Acoustic cavitation // Physics Reports. – 1980. – Vol. 61(3). – P. 159–251.
3. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.
4. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.
5. Расулова Н.Ф. Совершенствование способа подготовки технологической воды, используемой при размотке коконов: дисс. ... PhD. – Ташкент, 2026. – 120 с.

