Импульс давления в жидкости при коллапсе кавитационного пузырька в воде

Аганин А.А., Мустафин И.Н.

ИММ-обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань

Коллапс парогазовых пузырьков в жидкости обладает многими эффектами, представляющими значительный интерес. Одним из таких эффектов является излучение ударно-волновых импульсов, расходящихся в жидкости от поверхности пузырька. Такие импульсы могут на практике быть как вредными (способствуя кавитационному повреждению насосов, клапанов, мембран, лопаток гидротурбин и т.д.), так и полезными (способствуя очистке твердых поверхностей от загрязнений, интенсификации сонохимических реакций и т.д.).

В настоящей работе рассматривается эволюция такого импульса, возникающего в воде в результате коллапса кавитационного пузырька с начальным радиусом R_0 = 1 мм в условиях экспериментов [1]: давление воды p_∞ = 1 бар, температура T_∞ = 23°С. Динамика пара и жидкости описывается уравнениями [2]

$$\frac{\partial(\rho r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial r} = 0\,,$$

$$\frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 r^2 + p r^2)}{\partial r} = 2rp\,,$$

$$\frac{\partial(\rho e r^2)}{\partial t} + \frac{\partial[u r^2(\rho e + p)]}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \kappa \frac{\partial T}{\partial r}\right)$$

Здесь t – время, r – расстояние до центра пузырька, ρ – плотность, u – радиальная компонента вектора скорости, p – давление, $e = U + u^2/2$, U – удельная внутренняя энергия, T – температура, κ – коэффициент теплопроводности. Используются уравнения состояния жидкости и пара вида $p(\rho, T)$, $U(\rho, T)$ из работы [3].

Граничные условия имеют вид:

$r = 0$: $u = 0$, $\partial T / \partial r = 0$,

$r = R$: $\dot{R} = u_L + j/\rho_L = u_G + j/\rho_G$,

$p_L = p_G - 4\mu_L u_L / R - 2\sigma / R$,

$(\kappa\,\partial T/\partial r)_L - (\kappa\,\partial T/\partial r)_G = j l(p_G)$, $T_L = T_G$;

$r = r_\infty$: $p = p_\infty$, $T = T_\infty$,

где точка сверху означает производную по времени, μ_L – динамический коэффициент вязкости жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, l – теплота парообразования, j – интенсивность фазовых превращений, отнесенная к единице времени и единице поверхности. Нижний индекс L (G) относится к параметрам жидкости (пара). Интенсивность фазовых превращений определяется выражениями

$$j = \frac{\alpha'}{\sqrt{2\pi R_G}}\left(\frac{p_s(T)}{\sqrt{T}} - \frac{\chi p_G}{\sqrt{T}}\right),\ \Omega = \frac{j\sqrt{R_G T}}{\sqrt{2}\,p_G}\,,$$

$$\chi = e^{-\Omega^2} - \Omega\sqrt{\pi}\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\Omega} e^{-x^2}dx\right)$$

Здесь α' – коэффициент аккомодации, R_G – газовая постоянная пара, $p_s(T)$ – давление насыщенного пара при температуре T.

Методика расчета основана на методе С.К. Годунова [4]. Неограниченная область жидкости $R \le r < \infty$ заменяется сферическим слоем $R \le r < R_{ex}$, на внешней поверхности которого ставятся условия на бесконечности. Применяются подвижные сетки, связанные с поверхностью пузырька $r = R$ и внешней границей жидкости $r = R_{ex}$. В пузырьке и жидкости используются сетки с ячейками, сгущающимися к поверхности пузырька по геометрической прогрессии, с числом ячеек N_G и N_L и размером примыкающих к поверхности пузырька ячеек Δr_G и Δr_L, $\Delta r_G = \alpha_G R / N_G$, α_G =0.02. Полагается $\Delta r_L = \alpha \Delta r_G$, где α = 1.

Показано, что рассчитанный при N_G = 500 и N_L = 128000 временной профиль импульса на удалении 3 мм от центра пузырька удовлетворительно согласуется с соответствующими экспериментальными данными работы [1].

Список литературы:

[1] Lauterborn W., Kurz T. Physics of bubble oscillations // Rep. Prog. Phys. 2010. 73, 106501.

[2] Нигматулин Р.И., Аганин А.А., Топорков Д.Ю., Ильгамов М.А. Образование сходящихся ударных волн в пузырьке при его сжатии // ДАН. 2014, Т. 458. № 3. С. 282-286.

[3] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // Теплофизика высоких температур. 2011. № 2. С. 310-313.

[4] Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. - М.: Наука. 1976. 400с.