

Особенности роста парового пузырька при лазерном воздействии на биологическую жидкость

На данный момент времени лазерный источник энергии для нагрева различных веществ, в том числе биологических тканей и жидкостей, находит широкое применение в различного рода практических задачах и приложениях, в частности, в эндоскопических и пункционных хирургических вмешательствах, которые являются наиболее безопасными и перспективными. Одним из достоинств такого метода является высокая интенсивность теплового воздействия, преимущественно локализованного, а также достаточно хорошая степень контролируемости. Суть метода заключается в следующем. Лазерное излучение подается через оптоволокно, которое контактирует с биологическими тканями или жидкостями (кровью, лимфой, жидким содержимым кист и др.). Вблизи торца оптоволоконки осуществляется быстрый разогрев жидкости. Иницируется ее взрывное вскипание. Так как жидкость в целом существенно недогрета, кипение сопровождается не только ростом, но и коллапсом парогазовых пузырьков, сопровождающимся формированием горячих затопленных струй. Этими струями и осуществляется деструктивное воздействие на патологические образования. Несмотря на то, что исследованию процесса кипения посвящено огромное количество работ, до сих пор остается множество вопросов, требующих своего решения. В частности, это касается процесса кипения локально перегретой (в условиях общего недогрева) жидкости.

В работе представлена математическая модель роста парового пузырька в перегретой жидкости, одновременно учитывающая как динамические, так и тепловые эффекты и включающая в себя известные классические уравнения — уравнение Рэлея и уравнение энергии, записываемые применительно к рассматриваемой задаче с учетом специфики, связанной с процессом испарения жидкости. Показано, что представленная задача сводится к решению системы из трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Полученное решение хорошо согласуется с прямыми численными расчетами в широком диапазоне перегревов и на всех стадиях процесса, включая переходную, учет которой крайне необходим, если рассматривать рост пузырька в сильно перегретой жидкости, в особенности, на начальной стадии.

Выполнено численное моделирование динамики парового пузыря на торце оптоволоконки, образующегося в результате поглощения энергии лазерного излучения водой. Построенная модель опирается на применение Level-set модели, позволяющей описать движение двух фаз (вода и пар) и положение межфазной границы. В качестве замыкающих соотношений использовались данные экспериментов по изучению явления формирования кумулятивной струи в результате образования, роста и последующего схлопывания парогазового пузыря на торце оптоволоконки. Показано, что высказанная нами ранее гипотеза об определяющем влиянии гидродинамической картины на данный процесс (формирования кумулятивной струи), и введенного нами определяющего параметра: отношения максимального размера пузыря и диаметра оптоволоконки, подтверждается численными расчетами.