

УДК 536.423

ОСНОВНОЙ МЕХАНИЗМ И ЗАГАДКИ ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

В. В. Ягов

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении непрерывно возрастает с ростом приведенного давления. Этот давно установленный экспериментальный факт убедительно показывает, что попытки построения обобщенных корреляций для коэффициента теплоотдачи (КТО) при кипении на основе аналогии с однофазной конвекцией не имеют перспективы. Действительно, при высоких приведенных давлениях как средняя скорость парообразования, так и скорость роста паровых пузырьков (даже на ранней стадии их роста) становятся ничтожно малыми и не могут объяснить огромные значения КТО. Единственный механизм, дающий такое объяснение, - это интенсивное испарение жидкости у границы сухих пятен на поверхности нагрева. При пузырьковом кипении центры парообразования - это очень малые участки прямого контакта пар-стенка. Пики локальных тепловых потоков вблизи границы сухого пятна были получены в численных экспериментах и подтверждены опытными измерениями. Автором была разработана приближенная физическая модель и получено уравнение для теплового потока, приходящегося на одно сухое пятно. Малый размер сухих пятен позволяет рассматривать их как точечные стоки тепла. В пространстве между сухими пятнами (центрами парообразования) тепло от стенки к жидкости передается конвекцией, определяемой средней скоростью парообразования. Таким образом, общий тепловой поток от стенки при пузырьковом кипении складывается из теплового потока, обусловленного интенсивным испарением жидкости по границам сухих пятен, и «конвективного» теплового потока, действующего между сухими пятнами. Расчетное уравнение, связывающее тепловой поток при пузырьковом кипении с температурным напором и свойствами жидкости, выведено на основе модели с точностью до двух числовых множителей; оно надежно описывает опытные данные для неметаллических жидкостей в широком диапазоне тепловых потоков и приведенных давлений.

Поскольку для пузырькового кипения отсутствует замкнутое математическое описание, которое предполагает задание условий совместности на межфазной границе с неизвестной заранее формой, в отношении перспективы прямого численного моделирования в этой области следует проявлять «здоровый скептицизм», а разработка приближенных физических моделей представляется наиболее рациональным методом теоретического исследования. Однако, есть в пузырьковом кипении проблема, которая сегодня не до конца ясна даже на качественном уровне. Речь идет о зависимости числа центров парообразования на поверхности нагрева от физических свойств жидкости, характеристик поверхности и режимных параметров. При выводе расчетного уравнения для теплообмена при пузырьковом кипении автор использовал для плотности центров парообразования простое соотношение Д.А. Лабунцова, корректное по размерности и имеющее разумное качественное обоснование для технических поверхностей. Это соотношение, однако, имеет очевидные изъяны и не описывает некоторые опытные результаты, относящиеся к кипению высокомолекулярных жидкостей на хорошо смачиваемых поверхностях. Кроме того, некоторые новые экспериментальные результаты J. Klausner et al. (2004-2006) и, отчасти, T. Theofanous et al. (2002) требуют пересмотра традиционных представлений об активных центрах парообразования. Можно говорить и по-другому: эти результаты возвращают нас к старому вопросу –

почему кипение, например, гелия на абсолютно смачиваемой поверхности начинается при весьма малых перегревах стенки, а не при температуре гомогенной нуклеации. Получение обоснованного уравнения для плотности центров парообразования остается наиболее важной открытой проблемой теории пузырькового кипения.