

УДК 536.24.083

Определение статистически достоверного отрывного диаметра пузыря методом теневой анемометрии

Кукшинов Николай Владимирович

kukshinov@bmstu.ru

Евстигнеева Варвара Евгеньевна^(*)

yevstigneeva@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Отрывной диаметр пузыря является одной из важнейших характеристик пузырькового кипения. В работе предложен способ определения отрывного диаметра пузыря для поверхности с множеством центров парообразования. Способ основан на методе теневой анемометрии и последующим определением среднего отрывного диаметра из статистического распределения.

Ключевые слова: отрывной диаметр, высокоскоростная съемка, статистические распределения

Введение. Пузырьковый режим кипения характеризуется высокими значениями коэффициента теплоотдачи, поэтому используется во многих технических системах, в которых необходимо отводить большие тепловые потоки от элементов систем. На поверхности при пузырьковым кипением функционируют множество центров парообразования, которые могут генерировать существенно отличающиеся по размеру пузыри с различной частотой отрыва. Это приводит к необходимости использовать статистические методы для обработки результатов экспериментальных исследований [1, 2]. Статистические методы применимы при наличии большого количества данных, в части кипения это подразумевает массив кадров высокоскоростной съемки, для которых определяется размер каждого пузыря после процедуры фильтрации. Реализация такого подхода стала возможна только в последнее время с развитием компьютерных технологий, так как требуются ресурсы для хранения и обработки больших массивов данных.

Методы и материалы; результаты. Экспериментальная установка представлена на рис. 1. В герметичном сосуде, заполненном теплоносителем, установлен экспериментальный образец. С помощью лабораторного автоматического трансформатора (ЛАТР) на образец подается электрический ток, благодаря которому могут быть обеспечены различные плотности тепловых потоков. Дополнительный нагреватель, отделенный от рабочей полости защитным экраном, служит для поддержания температуры насыщения на протяжении всего эксперимента. Контроль температуры теплоносителя и поверхности образца производится с помощью термопар.

Теневой метод PSV (particle shadow velocimetry) [3] реализован с помощью высокоскоростной камеры со скоростью съемки до 8000 к/с и LED-осветителя, работающим в постоянном режиме. Камера находится на одном

уровне с экспериментальным образцом, а за установкой располагается экран, от которого отражается свет от LED-осветителя. Перед экспериментом проводится масштабирование изображений, необходимое для соотнесения размеров пузырей с пикселями на изображении. В результате рассчитываются масштабирующие коэффициенты для каждой оптической схемы экспериментов, выраженные отношением мкм/пиксель. После выполнения экспериментального этапа, полученные изображения обрабатываются с помощью программы с целью определения статистически достоверного отрывного диаметра, понимаемого как наиболее вероятный по выборке. В самой программе произведена бинаризация изображений и использован пороговый алгоритм. Пример получаемого кадра высокоскоростной съемки представлен на рис. 2. Результатом проведенного исследования с помощью теневого метода является нормализованное статистическое распределение, пример представлен на рис. 3.

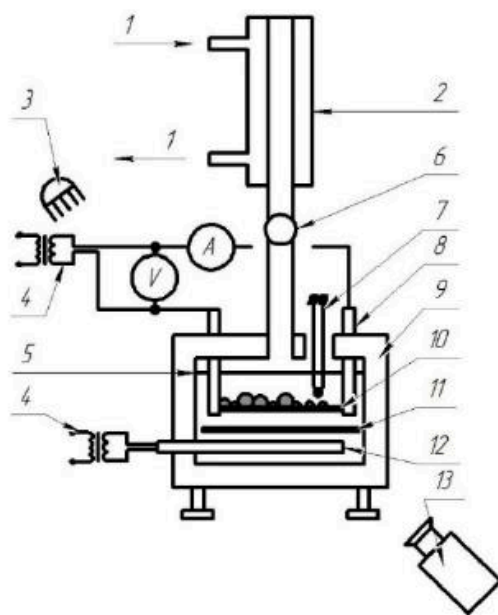


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — охлаждающая вода, 2 — конденсатор, 3 — источник света для видеосъемки, 4 — латр, 5 — уровень жидкости, 6 — манометр, 7 — термopара, 8 — токопровод, 9 — герметичная емкость, 10 — экспериментальный образец, 11 — экран, 12 — тэн, 13 — высокоскоростная видеокамера



Рис. 2. Кадр высокоскоростной съемки

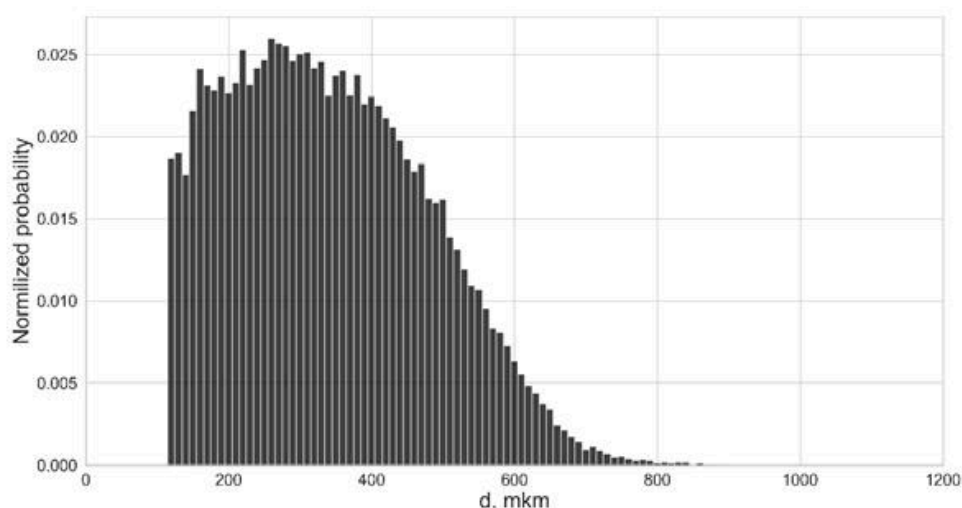


Рис. 3. Нормализованное распределение отрывных диаметров

Закключение. Разработан способ определения статистически достоверного отрывного диаметра пузыря с применением высокоскоростной съемки теневым методом. Способ позволяет по большому массиву данных получать характерный для исследуемой поверхности с множеством центров парообразования отрывной диаметр пузыря.

Список источников

- [1] Кутателадзе С.С., Гогонин И.И. Скорость роста и отрывной диаметр парового пузыря при кипении насыщенной жидкости в условиях свободной конвекции. *ТВТ*, 1979, т. 17, № 4, с. 792–797.
- [2] Кукшинов Н.В., Дмитриева А.А., Метелешко Л.И., Морской Д.Н. Экспериментальное исследование образования поверхности раздела фаз при кипении воды на цилиндрических поверхностях различного диаметра. *Теплофизика и аэромеханика*, 2025, т. 32, № 1, с. 169–174.
- [3] Zheng Z. et al. Measurement and analysis of impact dynamic parameters of micron-sized single particles using particle shadow velocimetry. *Journal of Aerosol Science*, 2024, vol. 178. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2024.106355>