

УДК 536.423

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ КРИЗИС ПРИ СПОНТАННОМ ВСКИПАНИИ ПЕРЕГРЕТОГО *n*-ПЕНТАНА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕКЛЯННОЙ ТРУБКЕ

© 2023 г. М. А. Паршакова¹, *, Е. В. Липнягов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

*E-mail: parmari@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.05.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

Исследована кинетика вскипания перегретого *n*-пентана в стеклянной трубке при помощи скоростной видеосъемки и быстродействующего датчика давления. Верх трубки запаян. Показано, что с приближением к пороговой температуре вскипание перегретой жидкости сопровождается значительными скачками и колебаниями давления, а формирование паровой пленки может начинаться с самоорганизации в пристеночном слое жидкости.

DOI: 10.31857/S0367676523702708, EDN: ECMCRB

ВВЕДЕНИЕ

Вскипание и последующее кипение перегретой жидкости относятся к фазовым переходам первого рода. При глубоких заходах в область метастабильных состояний этот процесс протекает в условиях интенсивного тепловыделения, сопровождается гидродинамическими ударами, паровым взрывом [1–5]. В аварийной ситуации эти явления приводят к негативным и даже катастрофическим последствиям, но в контролируемом процессе они могут сыграть и положительную роль.

При кипении могут возникать кризисы, характеризующиеся резким изменением теплоотдачи. В условиях свободной конвекции различают первый кризис, который наблюдается при переходе от пузырькового к пленочному, и второй кризис – наоборот, от пленочного к пузырьковому [6–11]. Они определяются гидродинамикой процесса. Непосредственный переход от свободной однофазной конвекции к пленочному кипению приводит к третьему кризису, имеющему термогидродинамическую природу. Четвертый кризис обусловлен чисто термодинамическими причинами. Он связан с термодинамической неустойчивостью жидкой фазы и заключается в образовании пристеночного парового слоя [10].

Третий кризис имеет прямое отношение к флуктуационным центрам кипения. Он встречается в области низких давлений при вскипании на поверхностях, обедненных центрами парообразования [12]. Вскипание имеет кавитационный характер – наблюдается взрывообразное возникновение микропузырей в окрестности нагревате-

ля, испарение пристеночного слоя жидкости. Также третий кризис кипения может возникать при квазистационарном перегреве пристеночного слоя жидкости вблизи нагревателя малого диаметра. Необходимым, хотя и недостаточным условием для него является образование характерного парового чупка – фронта вскипания с постоянной скоростью его распространения [13, 14]. При импульсном перегреве жидкости на проволочке с экстремально высокими скоростями нагрева ($\sim 10^6$ – 10^8 К/с) возникает четвертый кризис [1, 2, 15]. В этом случае вскипание происходит вблизи границы достижимого перегрева, определяемой по теории гомогенной нуклеации. Кризис теплоотдачи, возникающий при переходе к сферической форме испаряющейся капли, перегретой на горячей поверхности, также имеет термодинамическую составляющую [16, 17]. Он сопровождается фликкер-шумом, что является признаком самоорганизованной критичности в условиях неравновесного фазового перехода. Фликкер-шум возникает при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой [18], взрывном вскипании вихревой струи при истечении через сопло [19].

В условиях вынужденной конвекции при течении в трубах различают два основных вида кризиса, которые были определены В.Е. Дорошуким [7] как кризисы 1-го и 2-го рода. Кризис 1-го рода, аналогично кризису в большом объеме, связан с потерей устойчивости кипящего двухфазного слоя. Кризис кипения 2-го рода обусловлен разрушением жидкой пленки при переходе от дис-

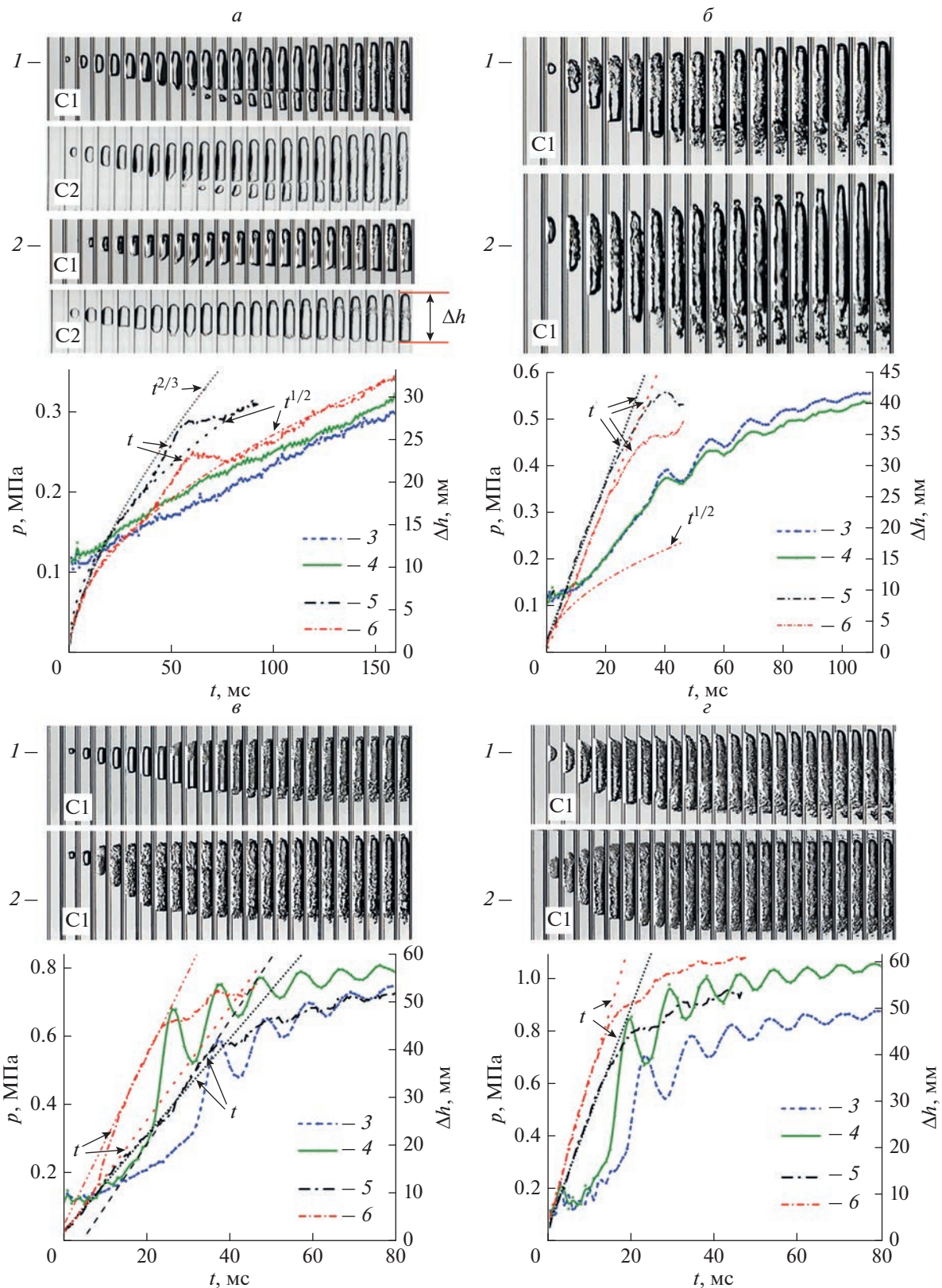


Рис. 4. Раскадровки начала вскипания перегретого *n*-пентана в стеклянной трубке (1, 2), синхронизированные с данными датчика давления Keller PAA-M5 (1 кГц) (3, 4) и временными зависимостями разности высот Δh (5, 6) при $p^* = 0.10$ МПа и разных температурах: (а) начальный пузырь без вторичных пузырей: (1, 3, 5) 85.0; (2, 4, 6) 90.0°C; (б) с вторичными пузырями (пузырьковым шлейфом): (1, 3, 5) 106.0; (2, 4, 6) 107.0°C; (в) паровой взрыв: (1, 3, 5) 124.0; (2, 4, 6) 125.0°C; (г) паровая пленка: (1, 3, 5) 128.0; (2, 4, 6) 137.0°C. Время между кадрами для проекций: C1 (а, б) 7.32; (в, г) 3.67 мс; C2 (а) 8 мс. Параметры аппроксимаций некоторых участков зависимости $\Delta h(t)$ приведены в табл. 1.

- dov A.V., Skokov V.N. et al. // Tech. Phys. 2003. V. 48. No. 6. P. 682.
17. Vinogradov A.V., Reshetnikov A.V., Skokov V.N., Koverda V.P. // Heat Transf. Res. 2007. V. 38. No. 5. P. 399.
 18. Гасанов Б.М. // ТВТ. 2018. Т. 56. № 4. С. 585; Gasanov B.M. // High Temperature. 2018. V. 56. No. 4. P. 565.
 19. Busov K.A., Mazheiko N.A., Kapitonov O.A. et al. // Int. J. Heat Mass Trans. 2020. V. 157. Art. No. 119711.
 20. Kozulin I.A., Bartkus G.V., Dimov S.V. // EPJ Web Conf. 2017. V. 159. Art. No. 00025.
 21. Nakoryakov V.E., Mezentssev I.V., Meleshkin A.V., Elistratov D.S. // J. Eng. Therm. 2015. V. 24. No. 4. P. 322.
 22. Липнягов Е.В., Паршакова М.А. // Тепл. проц. в техн. 2021. Т. 13. № 12. С. 561.
 23. Ершов А.П., Даммер А.Я., Куперштох А.Л. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 2. С. 129; Ershov A.P., Dammer A.Ya., Kupershtokh A.L. // J. App. Mech. Tech. Phys. 2001. V. 42. No. 2. P. 300.
 24. Perminov S.A., Lipnyagov E.V., Parshakova M.A. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2039. Art. No. 012027.
 25. Паршакова М.А., Липнягов Е.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 215; Parshakova M.A., Lipnyagov E.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 158.
 26. Липнягов Е.В., Паршакова М.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 221; Lipnyagov E.V., Parshakova M.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 164.
 27. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A. // Int. J. Heat Mass Trans. 2022. V. 196. Art. No. 123254.
 28. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A., Perminov S.A. // Int. J. Heat Mass Trans. 2017. V. 104. P. 1362.
 29. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A., Perminov S.A. // Int. J. Heat Mass Trans. 2017. V. 104. P. 1353.
 30. Hoffman R.L. // J. Colloid Interf. Sci. 1975. V. 50. No. 2. P. 228.
 31. Siebold A., Nardin M., Schultz J. et al. // Colloids Surf. A. 2000. V. 161. No. 1. P. 81.
 32. Мельникова О.Н., Ян Х. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 247; Melnikova O.N., Yang H. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 186.
 33. Эйдельман Е.Д. // СОЖ. 2000. Т. 6. № 5. С. 94.
 34. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Т. 1. Гидрофизика. М.: Физ. фак. МГУ, 2002. С. 144.
 35. Baidakov V.G., Protsenko S.P., Bryukhanov V.M. // Mol. Simul. 2022. V. 48. No. 12. P. 1051.
 36. Сон Л.Д. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 199; Son L.D. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 145.

Thermodynamic crisis during spontaneous boiling-up of superheated *n*-pentane in a vertical glass tube

M. A. Parshakova^a, *, E. B. Lipnyagov^a

^aInstitute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620016 Russia

*e-mail: parmari@yandex.ru

The kinetics of boiling-up of superheated *n*-pentane in a glass tube was studied by high-speed video and fast acting pressure sensor. The top of the tube is sealed. It is shown that, as the threshold temperature is approached, the boiling-up of a superheated liquid is accompanied by significant pressure jumps and oscillations, and the formation of a vapor film can begin with self-organization in the near-wall layer of the liquid.

Keywords: boiling-up, superheat, heterogenous nucleation, steam explosion, vapor film, pressure jump, two-phase flow, dynamic contact angle, *n*-pentane