

УДК 536.248

Парообразование в неазеотропной и азеотропной спирто-водяных смесях при течении в обогреваемом круглом канале*

В.Е. Жуков, Н.Н. Мезенцева, И.В. Мезенцев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Проведены исследования гидродинамики и теплообмена спирто-водяной смеси при её циркуляции по обогреваемому цилиндрическому каналу. В качестве рабочей жидкости использовались неазеотропная и азеотропная смеси с массовой концентрацией легколетучего компонента 22 и 95 % соответственно. Эксперименты проводились при давлении 0,018–0,02 МПа. Рабочий участок изготавливался из нержавеющей трубы с наружным диаметром 8 мм и длиной 4 м. Для визуального наблюдения состава двухфазного потока использовался оптический участок, установленный за рабочим участком. Проведенные эксперименты показали, что образование паровой фазы при циркуляции неазеотропной смеси по обогреваемому каналу начинается при температуре стенки ниже равновесной температуры смеси. Определяющим условием парообразования является превышение температуры стенки над равновесной температурой легколетучего компонента.

Ключевые слова: парообразование, теплообмен, фазовый переход, неазеотропные смеси, спирто-водяная смесь, глайд.

Применение смесей в качестве хладагентов и теплоносителей в различных энергетических системах приобрело широкое распространение [1 – 3]. Смеси имеют теплофизические свойства, отличные от свойств отдельных компонентов. Особое внимание следует уделить процессу парообразования в азеотропных и неазеотропных смесях. В азеотропных бинарных смесях коэффициент летучести одинаков для обеих компонент, в то время как в неазеотропных он существенно различается. Изучать поведение азеотропных и неазеотропных смесей можно на примере спирто-водяных смесей. Так, 95 %-й этиловый спирт является азеотропной смесью, а 10–50 %-е спирто-водяные смеси являются неазеотропными смесями со значительной величиной глайда, особенно в диапазоне давлений ниже атмосферного. Кроме того, спирто-водяные смеси могут самостоятельно использоваться в качестве хладоносителей в системах охлаждения. Такие смеси обладают высокой антикоррозионной активностью, т.к. спирт является одним из распространенных ингибиторов коррозии [4]. Другое преимущество водно-спиртовой смеси заключается в том, что в ней замерзание за счет контракции проявляется незначительно. Варьирование одного компонента (спирта) в растворе позволяет создавать теплоносители

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках проекта № 19-48-540024 в части создания стенда и проведения экспериментов, а также в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800216-1) в части модернизации системы измерений и сбора данных.

с заданными свойствами для конкретных условий [5]. В работе [6] было показано, что кризис теплообмена при кипении водно-спиртовых смесей осложнен диффузионными процессами на границе раздела и заметным воздействием сил поверхностного натяжения на устойчивость как отдельных пузырей пара, так и их ансамбля при околокритических значениях тепловых потоков. При определенной концентрации легколетучего компонента критический тепловой поток при кипении смеси достигает максимального значения, а теплоотдача при этой же концентрации имеет минимальное значение. Автором [6] был сделан вывод, что попытки описания данного парадокса не имели успеха. В работах [7, 8] были приведены статистические данные по характеристикам процесса кипения недогретой жидкости на основании результатов высокоскоростной киносъемки. Так, например, в исследовании [8] была представлена визуализация динамики пузырькового кипения недогретого потока водно-спиртовой смеси в горизонтальных прямоугольных каналах, а также показано влияние диаметра пузырька на коэффициент теплоотдачи. В работе [9] описывались экспериментальные исследования по кипению этанола и воды. Эксперименты проводились при давлении, близком к атмосферному.

Цель настоящей работы состоит в исследовании различия в процессах парообразования в азеотропной и неазеотропной спирто-водяных смесях при условиях течения в длинном горизонтальном канале.

Эксперименты проводились на смесях этанола с водой при массовых концентрациях легколетучей компоненты 22 % (неазеотропная смесь) и 95 % (азеотропная смесь). Давление в сосуде поддерживалось в пределах 0,018–0,02 МПа. Рабочий участок был изготовлен из трубки с внутренним диаметром 7,6 мм при наружном диаметре 8 мм. Длина рабочего участка составляла 4 м. Снаружи рабочий участок был изолирован от окружающей среды круглой пористой полимерной теплоизоляцией с наружным диаметром 16 мм и паспортной теплопроводностью 0,039 Вт/(м·К). Нагрев рабочего участка осуществлялся протеканием постоянного электрического тока непосредственно по стенке рабочего участка. Измерение температуры стенки осуществлялось тонкопленочными платиновыми терморезисторами HEL-700 номинального сопротивления 1000 Ом при величине измерительного тока 100 мкА. Падение напряжения на терморезисторах измерялось прецизионным 16-канальным аналого-цифровым преобразователем LTR-114 с разрешающей способностью 24 бит. Часть терморезисторов (9 из них) была установлена на нижней образующей рабочего участка, 4 — на верхней, также 2 терморезистора были установлены на необогреваемой части участка: на входе в рабочий участок и на выходе из него. Циркуляция смеси через рабочий участок осуществлялась циркуляционным насосом при постоянной частоте вращения. Расход жидкости через данный участок устанавливался регулирующим вентилем на его входе и измерялся турбинным расходомером. Жидкость в сосуде находилась под давлением собственных паров, которое поддерживалось спиральным теплообменником, расположенным в паровой области сосуда. На входе в рабочий участок жидкость подавалось недогретой до температуры насыщения на 11–18 К с нулевым паросодержанием. Тепло, выделяемое на рабочем участке, снималось теплообменником, по которому циркулировал теплоноситель из термостата. Давление в сосуде на входе в рабочий участок и на выходе из него измерялось моновакуумметрами. Для визуального наблюдения состава двухфазного потока на расстоянии 0,5 м за рабочим участком был установлен горизонтальный стеклянный оптический участок внутренним диаметром 8 мм.

На рис. 1 приведены опытные данные по распределению температуры стенки по длине рабочего участка, полученные в экспериментах с азеотропной спирто-водяной смесью с массовой концентрацией 95 %. На диаграмме представлены распределения температуры стенки T_{wall} по длине рабочего участка, линейная аппроксимация распределения температуры жидкости T_{liq} по длине участка и линейная аппроксимация температуры насыщения T_s . Распределение температуры жидкости построено по теплоемкости однофазного потока при известной температуре на входе в рабочий участок и известном тепловыделении на рабочем участке. Распределение температуры насыщения построено

по давлениям на входе и выходе рабочего участка, исходя из допущения линейного изменения давления по длине рабочего участка. В случае пересечения линии T_{liq} с линией T_s распределение температуры жидкости рассматривается по линии T_{liq} до точки пересечения, а далее по линии T_s . На диаграмме приведены три режима с одинаковой плотностью тепловыделения на рабочем участке ($q = 8400 \text{ Вт/м}^2$), но с различной массовой скоростью потока ($G = 355, 474 \text{ и } 548 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$). По наблюдениям в оптическом участке установлено, что скорости $G = 548 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ соответствовал однофазный поток, скорости $G = 474 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ — цепочки крупных пузырей, скорости $G = 355 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ — двухфазный поток с преимущественной паровой фазой в верхней части оптического участка. Как следует из представленных на диаграмме данных, образование паровой фазы начинается при условии превышения температуры стенки над температурой насыщения на протяженности более половины длины рабочего участка. Для режима $G = 355 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ наблюдается значительное повышение температуры на верхней образующей рабочего участка в области первой половины его длины. Это свидетельствует об образовании паровой прослойки в верхней части канала. При этом температура стенки превышает температуру насыщения по всей длине рабочего участка.

На рис. 2 приведены аналогичные данные по распределению температуры стенки по длине рабочего участка, полученные в экспериментах с неазеотропной спирто-водяной смесью с массовой концентрацией 22 %. На диаграмме также приведены три режима с одинаковой плотностью тепловыделения на рабочем участке ($q = 9500 \text{ Вт/м}^2$), но с различной массовой скоростью потока ($G = 260, 352 \text{ и } 544 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$). Аналогично по наблюдениям в оптическом участке получено, что скорости $G = 544 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ соответствовал однофазный поток, скорости $G = 352 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ — цепочки крупных пузырей, скорости $G = 260 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ — двухфазный поток с наличием множества мелких пузырей, напоминающих пену. Для режима с максимальным количеством пара массовое паросодержание по оценкам теплового и массового баланса составляет 0,02. Как видно на диаграмме, при $G = 352 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ на расстоянии 0,66 м от начала участка наблюдается значительный подъем температуры стенки, несмотря на то, что жидкость в этом сечении недогрета до равновесной для данной смеси температуры на 14 К, кроме того, температура стенки также ниже равновесной температуры. Однако относительно равновесной температуры T_s чистого легколетучего компонента (этанола) температура стенки выше по всей длине рабочего участка. При $G = 260 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ термометры, установленные на верхней образующей рабочего участка, регистрируют на длине до 3 м от начала участка

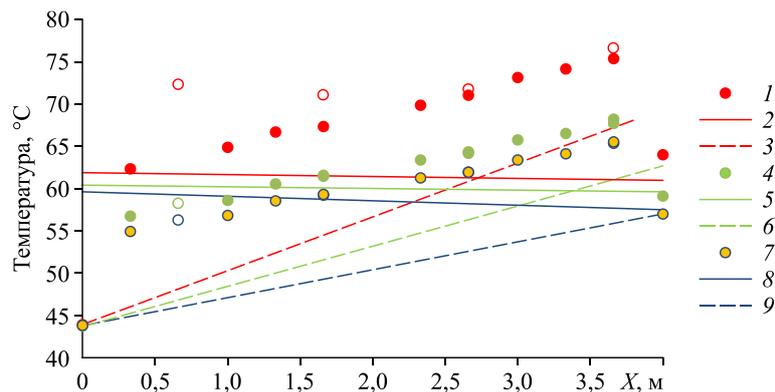


Рис. 1. Распределение температуры стенки по длине рабочего участка.

Азеотропная смесь 95 % масс. этанол, 5 % масс. вода;
 температура на нижней образующей — окрашенные символы,
 на верхней образующей — символы без заливки;
 при $G = 335$: T_{wall} (1), T_s (2), T_{liq} (3); при $G = 474$: T_{wall} (4), T_s (5), T_{liq} (6);
 при $G = 548$: T_{wall} (7), T_s (8), T_{liq} (9).

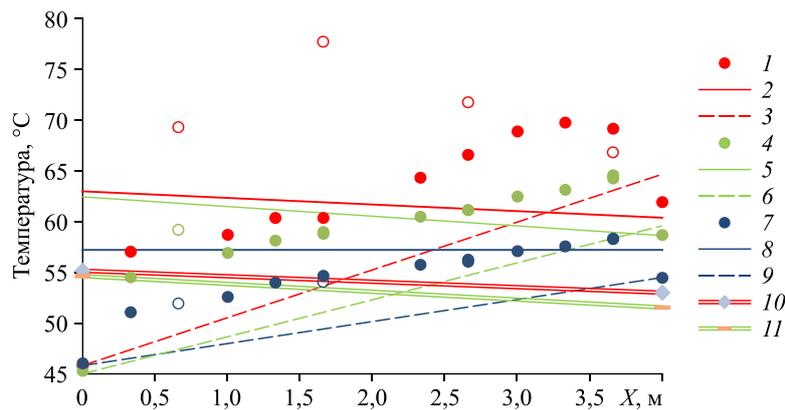


Рис. 2. Распределение температуры стенки по длине рабочего участка.

Неазеотропная смесь: 22 % масс. этанол, 78 % масс. вода;
 температура на нижней образующей — окрашенные символы,
 на верхней образующей — символы без заливки;
 при $G = 260$: T_{wall} (1), T_s (2), T_{liq} (3), T_s этанола (10);
 при $G = 352$: T_{wall} (4), T_s (5), T_{liq} (6), T_s этанола (11);
 при $G = 544$: T_{wall} (7), T_s (8), T_{liq} (9).

существенно более высокую температуру, чем на нижней образующей канала. На последней четверти рабочего участка, где температура жидкости достигает величины равновесной температуры смеси, температура стенки на верхней образующей ниже температуры на нижней образующей, что характеризует более интенсивную теплоотдачу в верхней части канала.

Проведенные эксперименты показали, что образование паровой фазы при циркуляции неазеотропной смеси по обогреваемому каналу начинается при температуре стенки ниже равновесной температуры смеси. Определяющим условием парообразования является превышение температуры стенки над равновесной температурой легколетучего компонента.

Список литературы

1. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. М.: Колос, 2000. 160 с.
2. Цветков О.Б. Современные хладагенты, хладоносители и проблемы экологии // Холодильная техника. 2008. № 1. С. 30–34.
3. Бараненко А.В., Кириллов В.В., Сивачев А.Е. О выборе хладоносителя для систем косвенного охлаждения // Вест. Международной академии холода. 2010. № 2. С. 22–24.
4. Кириллов В.В., Петров Е.Т. Водно-спиртовые растворы электролитов в качестве хладоносителей с оптимальными свойствами // Холодильная техника. 2005. № 7. С. 14–15.
5. Кириллов В.В., Сивачев А.Е. Основы создания и выбора хладоносителей с оптимальными свойствами для систем косвенного охлаждения // Холодильная техника и кондиционирование. 2010. № 1. С. 4–12.
6. Гогонин И.И. Теплообмен при пузырьковом кипении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 227 с.
7. Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л. Опытные данные по механизму кипения недогретой воды: скоростная съемка // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 299–307.
8. Suhas B., Sathyabhama A. Experimental investigation of heat transfer coefficient and correlation development for subcooled flow boiling of water–ethanol mixture in conventional channel // J. Thermal Sci. Engng Appl. 2017. Vol. 9, No. 4. P. 041003-1–041003-11.
9. Alnaser M., Spindler K., Muller-Steinhagen H. Single phase and flow boiling heat transfer of water and ethanol in a mini-channel array // 14th Intern. Heat Transfer Conference (IHTC). 2010. Vol. 1. P. 365–374.

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2021 г.,
 после доработки — 14 мая 2021 г.,
 принята к публикации 18 мая 2021 г.