

УДК 621.56

Состояние исследований в области изучения процессов конденсации в каналах малых размеров

Канд. техн. наук **Крупененков Н.Ф.** krupenenkov@mail.ru

Филатов А.С. filatov_alex037@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

На сегодняшний день исследования процессов теплообмена при фазовых превращениях в каналах малых размеров приобретают популярность, в первую очередь это связано с ростом технологических задач, которые требуют передачи больших потоков тепла в ограниченном объеме. В статье раскрывается вопрос классификации каналов малых размеров. Приведены данные об исследованиях процессов конденсации, в каналах малых размеров проводимых в течение последних 20 лет. Статья раскрывает актуальность исследования процессов конденсации холодильных агентов в каналах малых размеров.

Ключевые слова: конденсация, микроканалы, коэффициент теплопередачи, гидравлический диаметр, природные холодильные агенты

Condition of researches in the field of studying of processes of condensation in channels of the small sizes

Ph.D. **Krupenenkov N.F.** krupenenkov@mail.ru

Filatov A.S. filatov_alex037@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov st., 9

To date, the study heat and mass transfer processes in phase transformations in the channels of the small size of gaining popularity, primarily due to an increase of technological problems that require the transfer of large heat flows to a limited extent. The article deals with the issue of classification of channels of small dimensions. The article presents data on studies of condensation processes in the small size of the channels conducted over the last 20 years. The article reveals the relevance of studying the processes of condensation of refrigerants in the channels of small dimensions.

Keywords: condensation, microchannels, heat transfer coefficient, hydraulic diameter, natural refrigerants

Конденсация – это процесс перехода вещества из газообразного состояния в жидкое (или твердое) при докритических параметрах. Конденсация – экзотермический процесс, протекающий с выделением теплоты фазового перехода – теплоты конденсации. Конденсированная фаза может образовываться в объеме пара или на поверхности твердого тела и жидкости, имеющих более низкую температуру, чем температура насыщения пара при данном давлении. **Конденсация** происходит при изотермическом сжатии, адиабатическом расширении и охлаждении пара или одновременном понижении его давления и температуры, которое приводит к тому, что конденсированная фаза становится термодинамически более устойчивой, чем газообразная. Если при этом давление и температура выше, чем в тройной точке для данного вещества, образуется жидкость (сжижение), если ниже - вещество переходит в твердое состояние, минуя жидкое (десублимация).

Область применения конденсации весьма обширна, она широко применяется в химической технологии для разделения смесей, для сушки и очистки веществ и др., в энергетике, например в конденсаторах паровых турбин, в опреснительных установках, в холодильной технике для конденсация рабочего тела.

Конденсация на поверхности твердого тела, насыщенного или перегретого пара происходит при температуре поверхности, которая меньше, чем температура насыщения пара при его равновесном давлении над ней. Данный тип конденсации применяется во многих промышленных аппаратах, которые служат для конденсация целевых продуктов, подогрева различных сред, разделения паровых и парогазовых смесей, охлаждения влажных газов и т.д. При сжижении пара, на поверхности твердого тела, хорошо смачиваемой конденсатом, образуется сплошная пленка жидкости (пленочная конденсация); на поверхности, не смачиваемой конденсатом или смачиваемой частично - отдельные капли (капельная конденсация); на поверхности с неоднородными свойствами (например, на полированной металлической с окисленными загрязненными участками) - зоны, покрытые пленкой конденсата и каплями (смешанная конденсация).

На сегодняшний день исследования процессов теплообмена при фазовых превращениях в **микроканалах** приобретают популярность, в первую очередь это связано с ростом технологических задач, которые требуют передачи больших потоков тепла в ограниченном объеме, например в компактных парогенераторах/конденсаторах энергетических и криогенных устройств, системах охлаждения микропроцессоров и т.д [2]. Вопрос о границах разделения каналов на макро- и микро- является достаточно сложным и разные ученые имеют на этот счет различное мнение. К примеру, Кандликер С. Г. в своей работе [5] в основу классификации каналов ставит **гидравлический диаметр** D_h и предлагает разделять каналы по этому признаку на следующие виды:

- традиционные каналы, $D_h > 3$ мм;
- мини каналы, $200 \text{ мк} < D_h < 3$ мм;
- микро каналы, $10 \text{ мк} < D_h < 200 \text{ мк}$.

Разделение по такому принципу не несет под собой никакого объяснения о влиянии размеров канала, на изменение физических процессов происходящих в канале при изменении его размеров.

В работе [6] Кью и Корнвелл предложили в качестве определяющего параметра стесненность парового пузыря в канале, который определяется числом стесненности Co :

$$Co = \frac{1}{D_h} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_{г})}} \quad (1.1)$$

где: σ – поверхностное натяжение;

$\rho_{ж}, \rho_{г}$ – плотности жидкости и газа соответственно;

g – ускорение свободного падения.

При данном подходе было предложено считать границей раздела на микро- и макро- число $Co = 0,5$, при числе стесненности $Co > 0,5$ каналы считаются микроканалами.

Браунер и Уллманн в своей работе [10] утверждают, что для характеристик жидкой пленки в дисперсионном режиме, а так же определения смачиваемости стенки канала при режиме разделенных потоков безразмерный критерий Этвеша играет важную роль:

$$Eo = \frac{g(\rho_{ж} - \rho_{г})D_h^2}{8\sigma} \quad (1.2)$$

Границей разделения каналов на микро- и макро- авторы предлагают значение критерия Эвтеша $Eo=0,2$. Так же следует отметить, что критерий Eo прямо пропорционален числу Бонда $Bo = g(\rho_{ж} - \rho_{г})D_h^2/\sigma$, которое определяет соотношение подъемной силы к силам поверхностного натяжения.

Ли и Ванд в своей работе [7] описывают результаты экспериментального исследования влияния сил гравитации на поток путем определения границы перехода потока от не симметричного к симметричному. Граничное значение внутреннего диаметра D_{th} и критическое значение $D_{крит}$ были определены в сравнении с капиллярной длиной:

$$\begin{aligned} D_{th} &= 1,75 L_{cap} \\ D_{крит} &= 0,224 L_{cap} \end{aligned} \tag{1.3}$$

- при $D < D_{крит}$ влияние сил гравитации незначительно по сравнению с поверхностным натяжением, режимы потока симметричны;
- при $D_{крит} < D < D_{th}$ влияние сил гравитации и поверхностного натяжения сопоставимо, наблюдается небольшое разделение фаз в потоке;
- при $D_{th} < D$ силы гравитации преобладают и наблюдаются режимы потока, характерные для традиционных «больших» каналов;

Исследования процессов конденсации в каналах малых размеров начали развиваться сравнительно недавно. В таблице 1.1 в хронологическом порядке приведены данные об исследованиях процессов конденсации, в каналах малых размеров проводимых в течение последних 20 лет, из данной таблицы становится ясно, что в области изучения теплообменников с каналами малых размеров остается еще множество неизученных вопросов. На самом деле изучение процессов конденсации началось намного раньше, но в более ранних исследованиях исследования проводились для больших диаметров каналов в $4,8 < D_h < 22,0$ мм.

На рисунке 1.1 представлены основные формы поперечного сечения каналов малых размеров применяемые в исследованиях.

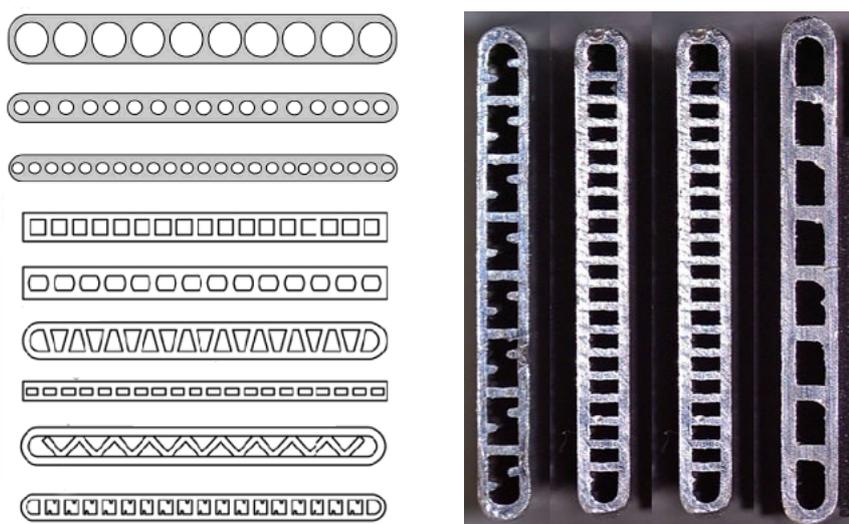


Рис. 1.1 Формы каналов применяемые для исследования процессов конденсации [1]

Таблица 1.1 [8]

| Авторы | Вещество | Гидравлический диаметр, мм | Количество каналов | Форма канала | Положение | Давление или температура насыщения | Удельный массовый расход, кг/(м ² ·с) | Коэффициент теплопередачи (кВт/м ²) | Паросодержание, х |
|--|----------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|----------------|------------------------------------|--|---|-------------------|
| Yang и Webb (1996) | R12 | 2.637 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 65 °С | 4001400 | 4-12 | 0.1-1 |
| Chang, Tsai и Hwang (1997) | R134a, R22 | 0.72-1.13 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 12.1 МПа | 30-100 | - | 0.5-1 |
| Dobson и Chato (1998) | R22, R134a, R32/R125 | 3.14-7.04 | SC | Круговой | Горизонтальное | 3545 | 75-800 | 5-15 | 0.10.9 |
| Yan и Lin (1999) | R134a | 2 | MC | Круговой | Горизонтальное | 2550 | 100-200 | 10-20 | 0-1 |
| Wang и Du (2000) | вода | 1.94-4.98 | SC | Круговой | Наклонное | 11.5 МПа | 11-95 | - | 0-1 |
| Webb и Ermis (2001) | R134a | 0.441.564 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 65 | 3001000 | 8 | 0.10.9 |
| Wang, Radcliff и Christensen (2002) | R134a | 1.46 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 6166.5 | 75-750 | - | 0.03-0.94 |
| Coleman и Garimella (2003) | R134a | 2.67-4.91 | MC | Круговой Прямоугольный | Горизонтальное | | 150-750 | - | - |
| Begg, Holley и Faghri (2003) | вода | 1.7-4 | SC | Круговой | Горизонтальное | 6090 | 10-25 | - | - |
| Baird, Fletcher и Haynes (2003) | R123, R11 | 0.92, 1.95 | SC | Круговой | Горизонтальное | 2072 | 70-600 | 15-110 | 0-1 |
| Kim и др. (2003) | R22, R410 | 1.41 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 45 | 200-600 | 5-15 | 0.10.9 |
| Кояма и др. (2003а), Кояма и др. (2003b) | R134a | 0.8071.062 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 60 | 100-700 | - | 0-1 |

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|------------|----|---------------|----------------|--------------|---------|------|-----------|
| Wilson и др. (2003) | R134a, R410 | 1.84-7.79 | SC | Сплюснутый | Горизонтальное | 35 | 75-400 | - | 0.10.8 |
| Shin и Kim(2004-2005) | R134a | 0.4941.067 | SC | Круговой | Горизонтальное | 40 | 100-600 | 5-20 | 0.10.9 |
| Cavallini и др. (2005) | R134a, R410a | 1.4 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 40 | 2001400 | - | 0.25-0.75 |
| Shin и Kim(2005) | R134a | 0.4941.067 | SC | Прямоугольный | Горизонтальное | 40 | 100-600 | 5-20 | 0.15-0.85 |
| Chen и Cheng (2005) | вода | 0.075 | MC | Трапецивидный | Горизонтальное | 0.130.23 MPa | - | - | - |
| Wu и Cheng (2005), Cheng и Wu (2005) | вода | 0.083 | MC | Трапецивидный | Горизонтальное | 0.130.42 MPa | 193-475 | - | - |
| Вихauer, Agarwal и Garimella (2006) | R134a | 0.5061.524 | MC | Круговой | Горизонтальное | 5060 | 150-750 | - | 0-1 |
| Agarwal, Вихauer и Garimella (2007) | R134a | 0.4240.839 | MC | Не круговой | Горизонтальное | 5060 | 150-750 | - | 0-1 |
| Agarwal и Garimella (2007) | R134a | 0.1-0.2 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 3060 | 200-800 | - | 1-0 |
| Hu и Chao(2007) | вода | 0.07-0.24 | MC | Трапецивидный | Горизонтальное | - | 5-45 | 6-40 | - |
| Ferriо и др. (2008) | пропан | 1.42 | MC | Прямоугольный | Vertical | 3050 | 20-50 | 4-10 | - |
| Dong и Yang (2008) | R141b | 0.0670.117 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | - | 50-500 | - | - |
| Quan, Chen и Wu (2008) | вода | 0.11-0.26 | MC | Трапецивидный | Горизонтальное | - | 100-250 | - | 0.10.8 |
| Wu и др. (2008) | вода | 0.0750.129 | MC | Трапецивидный | Горизонтальное | - | - | - | - |
| Zhang, Xu и Thome (2008) | вода | 0.058 | SC | Прямоугольный | Горизонтальное | 0.120.21 MPa | 173-630 | - | - |
| Zhang, Xu и Liu (2008) | вода | 0.058 | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | 0.120.21 MPa | 109-229 | - | - |
| Matkovic и др. (2009) | R134a, R32 | 0.96 | SC | Круговой | Горизонтальное | 40 | 1001200 | - | 0.03-0.99 |
| Абиев Р.Ш. и Лаврецов И.В. (2011) | вода | | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | - | - | - | - |
| Кузнецов В.В. и др. (2012) | вода/азот | | MC | Прямоугольный | Горизонтальное | - | - | - | - |

MC – многоканальный

SC – одноканальный

Анализ данных таблицы 1.1 дает четкое представление о состоянии исследований в области изучения процессов конденсации в каналах малых размеров. Как можно заметить из указанной таблицы на сегодняшний день имеется мало данных исследований процессов конденсации **природных холодильных агентов** (R717, R744, R290) в каналах малых размеров хотя данные агенты на сегодняшний день являются перспективными. Так же обстоит дело и с другими современными холодильными агентами, которые широко используются в холодильных установках, к примеру, смесевые холодильные агенты, такие как R410, R404, R507. В связи с этим задача изучения процессов конденсации в каналах малых размеров является актуальной и требующей особого внимания. Сегодня изучением данных вопросов активно занимаются американские коллеги, а так же деятельность в данном направлении активизировалась среди наших соотечественников. СО РАН занимается активной научной деятельностью в области изучения процессов теплопередачи в каналах малых размеров применительно для микроэлектронных устройств. Так же в университете ИТМО на кафедре Холодильных установок и Холодильных машин ведется активная работа по изучению процессов теплопередачи и гидродинамики в каналах малых размеров.

Список литературы

1. Бараненко А.В., Цветков О.Б., Лантев Ю.А., Ховалыг Д.М. Миниканальные теплообменники в холодильной технике // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». № 3, 2014
2. Кузнецов В.В. Капиллярная гидродинамика и тепломассообмен при фазовых превращениях в микроканалах // Сборник научных статей. Современная наука №2 (10), 2012
3. Минаков А.В., Лобанов А.А., Дектерев А.А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах. Вычислительная механика сплошных сред, 2012, Т.5, № 4, с.481- 488.
4. Akhil Agarwal, Heat Transfer и Pressure Drop During Condensation of Refrigerants in Microchannels, Georgia Institute of Technology, 2006
5. Kandlikar S.G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels // Experimental Thermal and Fluid Science, 2002. Vol. 26. P. 389-407.
6. Kew, P.A., Cornwell, K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels // Applied Thermal Engineering, 1997. Vol. 17 (8-10), pp. 705-715.
7. Li J., Wand B. Size effect on two-phase flow regime for condensation in micro/mini tubes.// Heat Transfer – Asian Research, 2003. Vol. 32, 65-71.
8. Satish Kandlikar, Srinivas Garimella, Dongqing Li, Stephane Colin, Michael King, Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. ELSEVIER, 2005
9. Stefano Bortolin, TWO-PHASE HEAT TRANSFER INSIDE MINICHANNELS, Università degli Studi di Padova
10. Ullmann A., Brauner N. The prediction of flow pattern maps in minichannels.// Multiphase Science and Technology, 2007. Vol. 19 (1), pp. 49-73.

Статья поступила в редакцию 23.11.2015 г.