ОБЩАЯ ФИЗИКА

УДК 536.242, 536.248.2 PACS: 64.70.F- 44.35.+c

Визуальные исследования процесса конденсации паров воды, этанола, хладогентов в охлаждаемых кремниевых и металлических микро- и миниканалах (обзор)

В. А. Иодис

В статье представлен обзор работ, посвященных визуальным исследованиям процесса конденсации паров воды или смеси паров воды и этанола в горизонтальных микроканалах. Микроканалы могли иметь разную форму: трапециевидную, треугольную, прямоугольную и квадратную. В исследованиях визуально наблюдались основные структуры потока, а именно: кольцевая, инжекционная, снарядная и пузырьковая. Отмечены также разновидности перечисленных структур потоков, в частности, полосово-кольцевая, гладкая кольцевая, эмульсионная, эмульсионно-кольцевая и вытянуто-пузырьковая. Приведены также результаты наблюдений конденсации потоков хладагентов HFE-7100, R134a и R1234ze(E). Выявлены схожие картины структур потока при различных соотношениях эффектов поверхностного натяжения и гравитационного воздействия. Продемонстрирована необходимость изучения структур потоков в микроканалах различной формы, вертикально и наклонно ориентированных к горизонту.

Ключевые слова: визуальные исследования, конденсация паров, микроканал, миниканал, структуры потока, массовая скорость пара, эквивалентный диаметр.

Ссылка: *Иодис В. А.* // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 401.
Reference: V. A. Iodis, Usp. Prikl. Fiz. **8** (6), 401 (2020).

Введение

Сегодня исследования процессов тепломассообмена при конденсации паров и газов в каналах микромасштаба (микроканалах) стали первоочередными, что связанно с ростом специфических технических и технологических задач в энергетике, холодильной технике, в парогидротермальных процессах и т. д. При этом именно визуальные исследования позволяют установить характер режима течения пленки конденсата в микроканалах, что необходимо при последующей обработке результатов моделирования процесса конденсации [1, 2].

Процессы теплопередачи, теплопроводности, теплоотдачи, происходящие в каналах микромасштаба (трещины горных пород, микроканалы теплообменных аппаратов) при конденсации паров, в отличие от макро- и миниканалов [3, 4], исследованы недостаточно и требуют детального изучения.

Целью данной статьи является представление обзора существующих работ,

Иодис Валентин Алексеевич, в.н.с., к.т.н.
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения РАН.
Россия, 683002, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Северо-Восточное шоссе, 30.
E-mail: nigtc@nigtc.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2020 г.

© Иодис В. А., 2020

посвященных визуальным исследованиям процесса конденсации паров воды, смеси паров воды и этанола в микроканалах (гравитационным эффектом можно пренебречь) сравнение результатов этих исследований с визуальными наблюдениями процесса конденсации хладагентов в мини-каналах, где эффект поверхностного натяжения преобладает над гравитационным эффектом.

При визуальном изучении процессов конденсации паров в микроканалах важную роль играют их размеры. Для их характеристики, классификации широко используют числа Бонда, Во, стесненности, Со, Эвтеша, Ео, значения эквивалентного диаметра D_h [5–11]. Например, *Kew* и *Cornwell* [10] для классификации микроканалов использовали числа Во и Со. В работе [10] было показано, что при значениях Во и Со меньше 4 или 0,5 соответственно канал можно классифицировать как микроканал. В исследовании *Kandlikar* и *Grande* [12–14] канал классифицировался, как микроканал, при значении D_h от 10 до 200 мкм, однако такая классификация не несет под собой объяснений о влиянии размеров канала на физические процессы в нем происходящие [15]. *Ullmann*, *Brauner* [11] предлагали для классификации каналов использовать значение Ео. При его значении менее 0,2 канал определяется как микроканал. Для классификации микроканалов при конденсации в них водяных паров *Cheng* и др. [9] предложена классификация каналов по значению только числа Во, определяющее соотношение между внешними силами (обычно силой тяжести) и силами поверхностного натяжения. Так, при значении Во < 0,05 или D_h < 0,58 мм ($t_{\text{водяного пара}}$ = 110 °С, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 65\times10^{-3}$ Н/м, давление пара на входе в канал $p_{\text{вх}}$ = 127,5–225,5 кПа, температура конденсата 42,8–90 °С) – это микроканал [5–8].

В данной работе рассматривались визуальные исследования процесса конденсации пара в микроканалах в соответствии с классификацией работы [9].

Визуальные исследования процесса конденсации водяных паров в горизонтальных микроканалах

Chen и *Cheng* [16] одними из первых провели наблюдения процесса конденсации водяного пара в микроканалах (см. таблицу). Наблюдения показали, что стационарная капельная конденсация происходит только на входе в гидрофобный микроканал, а в центре канала мелкие капли сливаются в более большие, располагаясь ближе к периферии сечения и блокируют его. Парообразное ядро потока, унося большие капли, дает возможность возникновению мелких капель, и процесс повторяется. В макроканале такое явление невозможно из-за дробления больших капель на мелкие при их слиянии, так как силы гравитации превосходят силы поверхностного натяжения. Однако в микроканале, где преобладает поверхностное натяжение, частота роста больших капель, блокирующих поперечное сечение канала и уносимых парообразным потоком, выше, чем в макроканале. По утверждению авторов работы [16], наблюдаемая структура потока при снижении диаметра канала и переходе от макросистемы к микросистеме увеличивает плотность теплового потока в три раза.

Таблица

Данные визуальных исследований процесса конденсации водяных паров в горизонтальных микроканалах

Авторы	Форма*	Среда	D_h, мкм	Канал: Длина×Ширина××Высота, мм	q, кВт/м^2	Структура потока	Массовый расход пара, $G_{пара}$, кг/ч	$v_{sпара}$, кг/м^{2}с
Chen Y., Cheng P., (2005) [16]	Т$_ц$	Водяной пар	75	80×0,2×0,05221	7000–12000	капельная	4,08	–
Wu H.Y., Cheng P., (2005) [17]	Т$_ц$	Водяной пар	82,8	30×0,2515×0,1557××0,565	–	капельная, кольцевая, инжекционная, снарядно-пузырьковая	4,08	193–475
Quan X., Cheng P., Wu H., 2008 [18]	Т$_ц$	Водяной пар	90	60×0,5×0,4278××0,0051	–	эмульсионная, кольцевая, инжекционна, снарядная, пузырьковая	–	165, 194, 243,385
			136	60×0,3×0,1442×0,11				
			120	60×0,427×0,3208××0,075				
			128	60×0,6×0,4938××0,075				
			128	60×0,268×0,1122××0,11				
Jiang R., Ma X., Lan Z., Bai Y., Bai T., (2015) [19]	Т$_п$	Водяной пар, этанол	165,87	50×0,11573××0,27669×0,44057	–	кольцевая, полосово-кольцевая, инжекционная, пузырьковая	–	175–268,4
Zhang C., ShenC., Chen Y., (2017) [24]	П	Водяной пар, этанол	150	56×0,3×0,1	–	капельная, полосово-кольцевая, капельно-кольцевая, капельно-инжекционная, капельно-снарядно-пузырьковая	–	–
Jiang R., Lan Z., Sun T., Zheng Y., Wang K., Ma X., (2018) [20]	Т$_п$	Водяной пар, этанол	126	L = 50	–	кольцевая (гладкая кольцевая и полосово-кольцевая)	–	259,2
			155	L = 50				504,8
Chen Y., Wu R., Shi M., Wu J., Peterson G.P., (2009) [21]	Т	Водяной пар	100	56,7×0,1933×0,1365	1417	кольцевая, инжекционная, снарядно-пузырьковая	6	55
			250	56,7×0,4834×0,3413	518			20,3
Zhang W., Xu J., Thome J. R., (2008) [22]	П	Водяной пар	57,8	5×0,8×0,03	2350–8640	кольцевая, инжекционная, снарядная, пузырьковая	–	1703,3–630,3
Wu J., Shi M., Chen Y., Li X., (2010) [23]	П	Водяной пар	90,6	56,7×0,4834×0,05	967–4516	эмульсионно-кольцевая (преобладающая), инжекционная (характерная), снарядно-пузырьковая	–	–

Окончание таблицы

Авторы	Форма*	Среда	D_h, мкм	Канал: Длина×Ширина×Высота, мм	q, кВт/м^2	Структура потока	Массовый расход пара, $G_{пара}$, кг/ч	$v_{sпара}$, кг/м^{2}с
Fang C., David M., Wang F., Goodson K. E., (2010) [27]	П	Водяной пар	100 – 333,3	60×(100, 200, 400, 500)×(100, 200, 250)	–	кольцевая, инжекционная, снарядная, пузырьковая	0,072	20–650
Odaymet A., Louahlia-Gualous H., (2012) [25]	К	Водяной пар		56,7×0,305×0,305	22–66	эмульсионная, кольцевая, цевая/пузырьковая, снарядно-вытянуто-пузырьковая, жидкостная		14–31

* $Т_п$ – трапециевидная; П – прямоугольная; Т – треугольная; К – квадратная.

Эксперимент по визуализации структур потока в процессе конденсации водяного пара, протекающего через массив трапецеидальных кремниевых микроканалов (см. таблицу) провели *Cheng* и *Wu* [17]. Дегазированный и деионизированный водяной пар, протекающий в микроканалах, охлаждали проточной водой при $t_в = 8$ °С. Эксперименты проводились при $p_{вх} = 4{,}15\times10^5$ Па – $1{,}25\times10^5$ Па (с уменьшением соответствующих массовых скоростей пара $v_{sпара}$ от 47,5 г/(см^2 с) до 19,3 г/(см^2 с)), в то время как давление на выходе в микроканал поддерживалось на уровне 1 атм. С уменьшением массового расхода в микроканалах наблюдались различные структуры потока: капельная, кольцевая, инжекционная, снарядно-пузырьковая.

Схема структур конденсационного потока представлена на рис. 1. При заданном $p_{вх}$ и массовом расходе конденсата, $G_{конд}$ характер потока зависел как от местоположения в канале, так и от продолжительности процесса. Интерес вызывает тот факт, что инжекционная структура потока пара, состоящая из процессов роста и отделения пузырьков пара, периодически появлялась и исчезала. Также было обнаружено, что возникновение инжекционного потока пара перемещалось от выхода к входу при уменьшении $G_{конд}$. Эксперименты показали, что периодическое появление инжекционной структуры потока, капельной, кольцевой структур в верхнем течении и снарядно-пузырьковой структуры потока (см. рис. 2) в нижнем течении вызывали колебания температуры стенок.

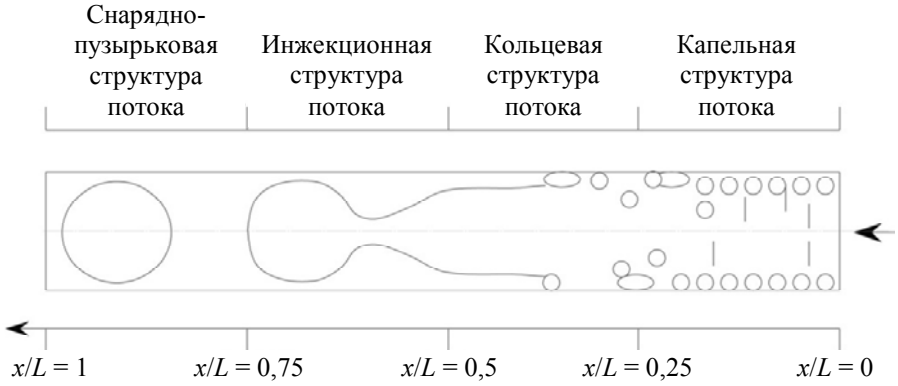

Рис. 1. Схема структур конденсационного потока.

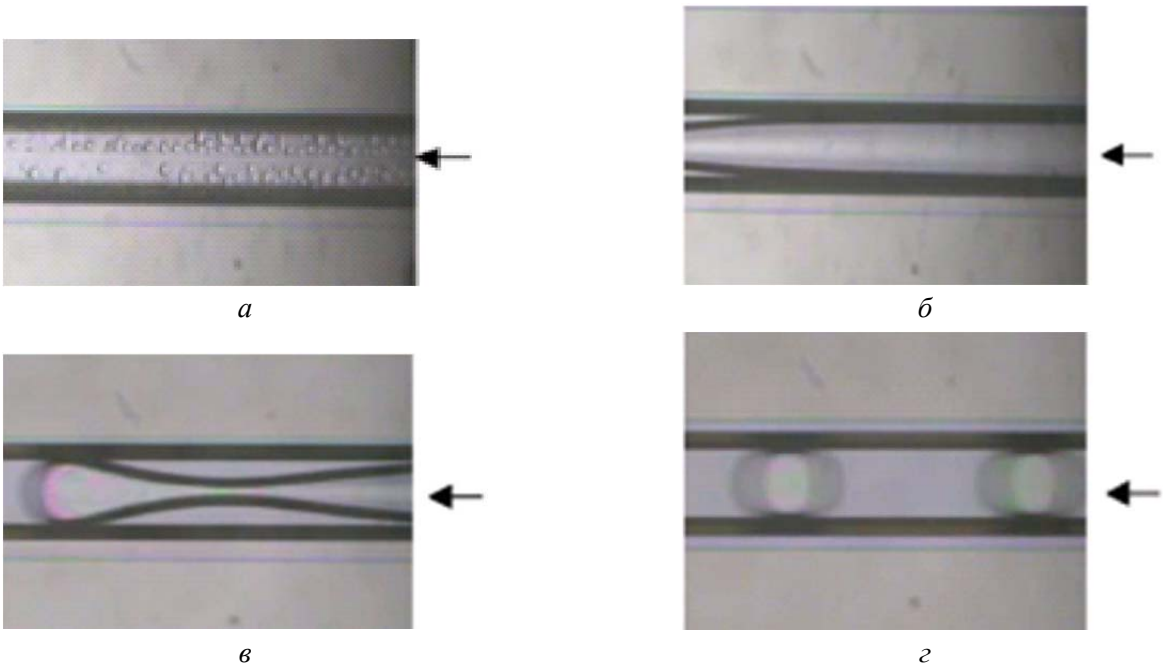

Рис. 2. Структуры конденсационного потока: а) – капельная (0 < x/L* < 0,3); б) – кольцевая (0,3 < x/L* < 0,55); в) – инжекционная (0,55 < x/L* < 0,75); г) – снарядно-пузырьковая структура (0,75 < x/L* < 1).
**** Отношение продольной координаты потока к длине микроканала.***

Температура стенок вблизи места, где наблюдалась инжекция пара, колебалась более резко. Продолжив визуальные исследования процесса конденсации водяного пара в микроканалах, *Cheng*, *Wu* и *Quan* [18] в 2008 г. визуально наблюдали для микроканалов большего D_h и меньшей $v_{s\text{пара}}$, что структура потока вдоль канала изменялась, а именно, от эмульсионной (см. рис. 3), кольцевой, инжекционной до снарядной и пузырьковой (см. таблицу). Переход режима от кольцевого к снарядному зависит от $v_{s\text{пара}}$ и скорости его охлаждения $v_{\text{охлпара}}$. *Cheng*, *Wu* и *Quan* обнаружили инжекции потока с устойчивыми и неустойчивыми паровыми связями, зависящими от $v_{s\text{пара}}$ и $v_{\text{охлпара}}$. Установлено, что более высокая $t_{\text{в}}$ на входе в канал и более высокая $v_{s\text{пара}}$ для микроканала меньшего D_h усиливают нестабильность пленки конденсата, приводя к более высокой частоте инжекции потока и перемещая его ближе к выходу канала. При той же $v_{s\text{пара}}$ в микроканале с меньшим D_h частота инжекции выше из-за влияния поверхностного натяжения.

Рис. 3. Эмульсионная структура потока.

При конденсации паров этанола и воды [19] в горизонтальных трапециевидных микроканалах при концентрации этанола от 2 до 60 % визуально наблюдались кольцевая, полосово-кольцевая, инжекционная и пузырьковая структуры потока, что отличается от конденсационных структур потока чистого водяного пара (см. таблицу). Структуры потока зависят от концентрации этанола на входе в каналы, при ее увеличении быстрее образуются капли конденсата, которые сливаясь, образуют полосы, что приводит к полосово-кольцевой структуре. Как показали исследования, структуры потока связаны с разностью теплосодержаний между конденсатом паров смеси и тонкой пленкой жидкости в микроканале.

Продолжив исследования конденсации смесей паров этанол-вода в трапециевидных горизонтальных микроканалах, *Jiang R.* и др. [20] пришли к аналогичным выводам.

Кольцевой, инжекционный, снарядный и пузырьковый режимы визуально наблюдались [21] в треугольных микроканалах (см. таблицу). *Chen Y.*, *Wu R.*, *Shi M.* и др. отмечали преобладание напряжения сдвига и сил поверхностного натяжения на границе жидкость–пар. При одних и тех же значениях критерия $\mathrm{Re}_{\text{пара}}^{\text{вх}}$, с увеличением $G_{\text{конд}}$ и D_h место инжекции потока отдалялось от входа в микроканал, возрастала частота инжекции f_p.

Zhang W. и др. [22] исследовали структуры потока конденсата водяного пара в одиночном горизонтальном прямоугольном кремниевом микроканале (D_h = 57,8 мкм, см. таблицу) при различных скоростях его охлаждения. Эксперименты были проведены при следующих параметрах температур и давлений на входе в канал: от 102,5 до 131,1 $^{\circ}$C, от 115,84 до 288,49 кПа. Изменяя скорость охлаждения во время конденсации насыщенного водяного пара, можно было менять частоту образования пузырьков, их форму и размер. При низких скоростях охлаждения структура потока в микроканале состояла из удлиненного пузырька (кольцевая и инжекционная структуры потока), располагающегося у входа в канал, который далее по ходу канала сжимался в ряд эллиптических пузырьков (снарядная и пузырьковая структуры потока). Форма испускаемых пузырьков после их образования менялась, и пузырек приобретал устойчивую форму вертикального эллипса. При более высоких скоростях охлаждения частота образования пузырьков значительно увеличилась, в то время как размер пузырьков уменьшился. Испускаемые пузырьки в этом случае сразу же образовывали круглую форму (после их отделения от удлиненного пузырька), и их форма уже не менялась (пузырьковая структура потока). Данное исследование подтверждает визуальные исследования процесса конденсации водяного пара в трапециевидных, треугольных, прямоугольных микроканалах [17, 18, 21].

Результаты исследований *Wu J.*, *Shi M.* и др. [23] (см. таблицу) показали, что с увеличением $\mathrm{Re}_{\text{пара}}$ на входе и числа Вебера $\mathrm{We}_{\text{жид}}$ место инжекции двигается по направлению от входа в прямоугольный микроканал (с отношением ширина/глубина равным 9,668) к его выходу, возрастает ее частота. Данное исследование подтверждает визуальные наблюдения процесса конденсации пара в микроканалах [17, 18, 21, 22].

Также были проведены исследования конденсации смеси водяной пар–этанол с его концентрациями 2 %, 10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % для прямоугольного микроканала с гидрофобной поверхностью [24]. Визуально наблюдались капельная, полосово-кольцевая, капельно-кольцевая, капельно-инжекционная, капельно-снарядно-пузырьковая структуры потока (см. таблицу), что близко к наблюдаемым структурам потока этанола и воды в горизонтальных трапециевидных микроканалах [19, 20]. Эксперимент показал, что с повышением концентрации этанола капельно-инжекционная структура потока сразу переходит в снарядно-пузырьковую без образования капель. Если пары этанола являются основным компонентом смеси, капельная структура потока почти исчезает, и полосово-кольцевой, кольцевой, инжекционный и снарядко-пузырьковый потоки образуются последовательно. Авторами отмечалось, что микроканалы с гидрофобной поверхность способствуют капельной конденсации, что интенсифицирует процесс теплопередачи.

При конденсации водяного пара, входящего при давлении от 101 до 115 кПа и массовой скорости от 14 до 31 кг/(м^2 с) в квадратный микроканал [25], образовывались эмульсионная, кольцевая, кольцевая/пузырьковая, снарядно-вытянуто-пузырьковая структуры потока, очень похожие на структуры потока в прямоугольных мик-

роканалах. Экспериментальные данные показали, что с увеличением $G_{\text{пара}}$ местный коэффициент теплоотдачи увеличивается, а в микроканале образуется снарядная структура потока.

Визуальные исследования процесса конденсации хладагентов *HFE*-7100, *R*134*a* и *R*1234*ze*(*E*) в миниканалах

Схожие результаты получали исследователи [26, 28–30] при наблюдении процесса конденсации потоков хладагентов *HFE*-7100, *R*134*a* и *R*1234*ze*(*E*) для каналов при значениях 0,05 < Bo < 3,0. При данных значениях числа Bo канал можно классифицировать как миниканал.

Al-Zaidi A. H. и др. [26] при визуальном изучении конденсационного потока диэлектрического хладагента *HFE*-7100 в прямоугольном миниканале при Bo ≈ 0,32 наблюдали в основном кольцевую структуру потока, переходящую в снарядную и пузырьковую. Эксперименты проводились при температуре насыщения 60 °C, диапазоне $v_{s\text{пара}}$ от 48 до 126 кг/(м^2 с) и диапазоне температур охлаждающей жидкости на входе 20–40 °C. Результаты исследований структур потока схожи со структурами потоков при конденсации водяного пара в прямоугольных микроканалах с Bo ≈ 0,0005 [13] и Bo ≈ 0,0015÷0,0167 [27].

Кольцевой, устойчивый инжекционный, квазисимметрично-волновой, снарядный и пузырьковый потоки наблюдались в работе [28] при конденсации хладагентов *R*134*a* и *R*1234*ze*(*E*) в параллельных, горизонтальных, овальных микроканалах с гидравлическим диаметром 301,6 мкм (Bo ≈ 0,114–0,128), температурой насыщения 20–25 °C, v_s от 6 до 50 кг/(м^2 с). Кроме того, наблюдались три переходных структуры потока: установившаяся инжекционная, волново-инжекционная и соединительно-жидкостная структуры потока. Как показали исследования, при низкой массовой скорости хладагента переходные структуры потока исчезают и структура становится кольцевой. Инжекция характеризовалась периодическим ростом и отрывом пузырьков и проходила в три этапа: с отрывом пузырька, образованием пузырька, ростом пузырька. Первые два этапа вызваны поверхностным натяжением, третий – массовой скоростью хладагента, приводящей к более высокой скорости перемещения пузырька, увеличению длины пузырька в точке отрыва и более быстрому его сжатию. Образующийся новый пузырек в конце кольцевого потока препятствовал течению конденсата, приводил к накоплению конденсата и уменьшению площади поперечного сечения парообразного ядра потока. При круглой форме поперечного сечения паровой сердцевины потока непрерывное увеличение капиллярной силы и уменьшение давления пара приводили к быстрому разрыву паровой сердцевины. Результаты исследований структур потока также схожи с результатами в работах [22, 27].

Продолжив исследования работы [28], но при больших значениях $v_{s\text{пара}}$ = 60–250 кг/(м^2 с), *Wang* и *Li* [29] визуально установили уже пленочно-волновую, снарядную и пузырьковую структуры потока конденсата. Результаты данных исследований показали, что длина волны пленки увеличивается с уменьшением $v_{s\text{пара}}$ и снижением сухости пара, однако скорость волны пленки увеличиваются с увеличением $v_{s\text{пара}}$. Метод охлаждения – асимметричное или симметричное – влиял только на длину и скорость волны пленки вдоль канала.

Для каналов, имеющих различные углы наклона к горизонту, *Lin* и *Wang* [30] визуально исследовали конденсацию *HFE*-7100 в каждом из 15 каналов (Bo ≈ 0,63) при фиксированном давлении на выходе 110 кПа, $v_{s\text{пара}}$ от 100 до 300 кг/(м^2 с) и сухости пара от 0,1 до 0,9. Основной структурой потока являлась снарядно-пузырьковая структура. Пар, конденсируясь,

уменьшается в размере и постепенно сжимается вдоль канала. Однако наблюдалось, что поток пара *HFE*-7100 останавливался, а затем двигался в обратном направлении против основного направления потока (см. рис. 4).

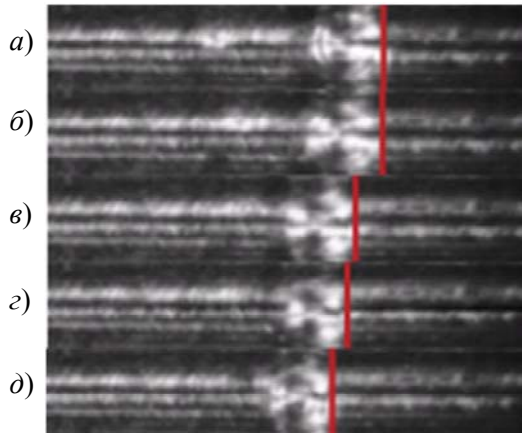

Рис. 4. Движение конденсационного потока в миниканале при вертикальной ориентации к горизонту: а) – 0,003 с; б) – 0,006 с; в) – 0,009 с; г) – 0,012 с.

Такая структура потока возникала при вертикальном и вертикально-наклонном расположениях каналов к горизонту. *Lin* и *Wang* [30] объясняли данное явление тем, что остановившийся поток пара может преодолевать инерцию потока и нести конденсат обратно. Это явление особенно заметно при низкой массовой скорости, вертикальном расположении и снижает интенсивность процесса теплопередачи.

Заключение

Анализ визуальных исследований конденсации водяных паров в трапециевидных, треугольных, квадратных и прямоугольных микроканалах с различными значениями критерия Bo показал ограниченное количество работ по данной тематике. Результаты выполненных исследований не всегда имеют однозначный характер. Во всех работах визуально наблюдались кольцевая, инжекционная, снарядная и пузырьковая структуры потока. Также исследователи наблюдали разновидности перечисленных структур потоков: полосово-кольцевая, гладкая кольцевая, эмульсионная, эмульсионно-кольцевая и вытянуто-пузырьковая. Однако границы данных структур потока отличаются в зависимости от условий проведения эксперимента – $v_{s\text{пара}}$, скорости его охлаждения, $\mathrm{Re}_{\text{пара/жидкости}}$, формы поперечного сечения и D_h. Изменяя эти условия, можно менять границы между структурами потока, а также наблюдать новые разновидности структур потока.

Похожие результаты получены при конденсации потоков хладагентов *HFE*-7100, *R*134*a* и *R*1234*ze*(*E*) в горизонтальных миниканалах (0,05 < Bo < 3,0). В работах визуально наблюдались основные структуры потока: кольцевая, снарядная и пузырьковая, а также переходные структуры: установившаяся инжекционная структура, волново-инжекционная, соединительно-жидкостная, пленочно-волновая. Однако при конденсации пара *HFE*-7100 в вертикальном миниканале наблюдался реверсивный поток пара, который сначала останавливался, а затем двигался вместе с конденсатом в обратном направлении.

Обзор выполненных исследований в микро- и миниканалах показал схожие картины структур потока при различных соотношениях эффектов поверхностного натяжения и гравитационного воздействия, а также выявил необходимость изучения структур потоков в микроканалах различной формы, но вертикально и наклонно ориентированных к горизонту.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пашкевич Р. И.* // ГИАБ. 2015. № 63. С. 378.

2. *Пашкевич Р. И., Таскин В. В.* // Термогидродинамическое моделирование теплопереноса в породах Мутновской магмагеотермальной системы. – Владивосток: Дальнаука, 2009.

3. *Muratov P. V., Pashkevich R. I.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 91. P. 494.

4. *Pashkevich R. I., Muratov P. V.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 81. P. 804.

5. *Иодис В. А.* // ГИАБ. 2018. № 12 (специальный выпуск 60). С. 141.
6. *Иодис В. А.* // ГИАБ. 2018. № 12 (специальный выпуск 59). С. 163.
7. *Иодис В. А., Пашкевич Р. И.* // ГИАБ. 2014. № ОВ2. С. 99.
8. *Пашкевич Р. И., Иодис В. А.* // ГИАБ. 2014. № ОВ2. С. 136.
9. *Cheng P., Quan X., Wu H.* // Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics. 2008.
10. *Kew P. A., Cornwell K.* // Appl. Therm. Eng. 1997. Vol. 17. P. 705.
11. *Ullmann A., Brauner N.* // Multiphase Science and Technology. 2007. Vol. 19. № 1. P. 49.
12. *Kandlikar S. G., Grande W. J.* // Heat Transfer Eng. 2003. Vol. 24 (1). P. 3.
13. *Kandlikar S. G.* // Exp. Thermal Fluid Sci. 2002. Vol. 26. P. 389.
14. *Kumar V., Vikash, Nigam K. D. P.* // Chem. Eng. Sci. 2017. Vol. 169. P. 34.
15. *Крупененков Н. Ф.*, *Филатов А. С.* // Холодильная техника и кондиционирование. 2015. № 4. С. 40.
16. *Chen Y., Cheng P.* // Int. Commun. Heat Mass Transf. 2005. Vol. 32. P. 175.
17. *Wu H. Y., Cheng P.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48. P. 2186.
18. *Quan X., Cheng P., Wu H.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51. P. 707.
19. *Jiang R., Ma X., Lan Z., Bai Y., Bai T.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 90. P. 339.
20. *Jiang R., Lan Z., Sun T., Zheng Y., Wang K., Ma X.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 127. P. 160.
21. *Chen Y., Wu R., Shi M., Wu J., Peterson G. P.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52. P. 5122.
22. *Zhang W., Xu J., Thome J. R.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51. P. 3420.
23. *Wu J., Shi M., Chen Y., Li X.* // Int. J. Thermal Sci. 2010. Vol. 49. P. 922.
24. *Zhang C., Shen C., Chen Y.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 104. P. 1135.
25. *Odaymet A., Louahlia-Gualous H.* // Exp. Thermal Fluid Sci. 2012. Vol. 38. P. 1.
26. *Al-Zaidi A. H., Mahmoud M. M., Karayiannis T. G.* // Exp. Thermal Fluid Sci. 2018. Vol. 90. P. 153.
27. *Fang C., David M., Wang F., Goodson K. E.* // Int. J. Multiphase Flow. 2010. Vol. 36. P. 608.
28. *Wang J., Li J. M., Hwang Y.* // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 115. P. 233.
29. *Wang J., Li J. M.* // Int. J. Multiphase Flow. 2018. Vol. 101. P. 125.
30. *Lin K.-W., Wang C.-C.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 106. P. 518.

PACS: 64.70.F- 44.35.+c

Visual studies of the condensation process of water vapor, ethanol, and refrigerants in cooled silicon and metal micro- and minicannels (a review)

V. A. Iodis

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences
30 Severo-Vostochnoe Shosse, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russia

Received September 14, 2020

The article provides an overview of works devoted to visual studies of the process of condensation of water vapor or a mixture of water vapor and ethanol in horizontal microchannels. Microchannels could have different shapes: trapezoidal, triangular, rectangular, and square. In the studies, the main flow structures were visually observed, namely: annular, injection, slug and bubble. The varieties of the listed flow structures are also noted, in particular, strip-annular, smooth annular, emulsion, emulsion-annular and elongated-bubble. The results of observations of condensation

of flows of refrigerants HFE-7100, R134a and R1234ze(E) are also presented. Revealed similar patterns of flow structures at different ratios of the effects of surface tension and gravitational action. The necessity of studying the structures of flows in microchannels of various shapes, vertically and obliquely oriented to the horizon, has been demonstrated.

Keywords: visual studies, vapor condensation, microchannel, minichannel, flow structures, mass vapor velocity, equivalent diameter.

REFERENCES

1. R. I. Pashkevich, GIAB, No. 63, 378 (2015).

2. R. I. Pashkevich and V. V. Taskin, *Termogidrodinamicheskoe modelirovanie teploperenosa v porodah Mutnovskoj magmageotermal'noj sistemy* (Dal'nauka, Vladivostok, 2009).

3. P. V. Muratov, Int. J. Heat and Mass Transfer **91**, 494 (2015).

4. R. I. Pashkevich and P. V. Muratov, Int. J. Heat and Mass Transfer **81**, 804 (2015).

5. V. A. Iodis, GIAB, No. 12 (60), 141 (2018).

6. V. A. Iodis, GIAB, No. 12 (59), 163 (2018).

7. V. A. Iodis and R. I. Pashkevich, GIAB, No. OV2, 99 (2014).

8. R. I. Pashkevich and V. A. Iodis, GIAB, No. OV2, 136 (2014).

9. P. Cheng, X. Quan, and H. Wu, Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics (2008).

10. P. A. Kew and K. Cornwell, Appl. Therm. Eng. **17**, 705 (1997).

11. A. Ullmann and N. Brauner, Multiphase Science and Technology **19** (1), 49 (2007).

12. S. G. Kandlikar and W. J. Grande, Heat Transfer Eng. **24** (1), 3 (2003).

13. S. G. Kandlikar, Exp. Thermal Fluid Sci. **26**, 389 (2002).

14. V. Kumar, Vikash, and K. D. P. Nigam, Chem. Eng. Sci, **169**, 34 (2017).

15. N. F. Krupenenkov and A. S. Filatov, Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie, No. 4, 40 (2015).

16. Y. Chen and P. Cheng, Int. Commun. Heat Mass Transf **32**, 175 (2005).

17. H. Y. Wu and P. Cheng, Int. J. Heat and Mass Transfer **48**, 2186 (2005).

18. X. Quan, P. Cheng, and H. Wu, Int. J. Heat and Mass Transfer **51**, 707 (2008).

19. R. Jiang, X. Ma, Z. Lan, Y. Bai, and T. Bai, Int. J. Heat and Mass Transfer **90**, 339 (2015).

20. R. Jiang, Z. Lan, T. Sun, Y. Zheng, K. Wang, and X. Ma, Int. J. Heat and Mass Transfer **127**, 160 (2018).

21. Y. Chen, R. Wu, M. Shi, J. Wu, and G. P. Peterson, Int. J. Heat and Mass Transfer **52**, 5122 (2009).

22. W. Zhang, J. Xu, and J. R. Thome, Int. J. Heat and Mass Transfer **51**, 3420 (2008).

23. J. Wu, M. Shi, Y. Chen, and X. Li, Int. J. Thermal Sci. **49**, 922 (2010).

24. C. Zhang, C. Shen, and Y. Chen, Int. J. Heat and Mass Transfer **104**, 1135 (2017).

25. A. Odaymet and H. Louahlia-Gualous, Exp. Thermal Fluid Sci. **38**, 1 (2012).

26. A. H. Al-Zaidi, M. M. Mahmoud, and T. G. Karayiannis, Exp. Thermal Fluid Sci. **90**, 153 (2018).

27. C. Fang, M. David, F. Wang, and K. E. Goodson, Int. J. Multiphase Flow **36**, 608 (2010).

28. J. Wang, J. M. Li, and Y. Hwang, Appl. Therm. Eng. **115**, 233 (2017).

29. J. Wang and J. M. Li, Int. J. Multiphase Flow **101**, 125 (2018).

30. K.-W. Lin and C.-C. Wang, Int. J. Heat and Mass Transfer **106**, 518 (2017).