

УДК 532.5

РЕЖИМЫ СТЕКАНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УГЛАХ СМАЧИВАНИЯ¹

© 2023 г. А. Ю. Сахнов*, О. А. Володин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко

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

*E-mail: aleksei_sakhnov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.09.2022 г.

После доработки 22.11.2022 г.

Принята к публикации 06.12.2022 г.

Представлены результаты трехмерного численного моделирования динамики стекания пленки смеси хладагентов 0.9 мол. доли R21 + R114. Рассматривалось стекание жидкости по внешней боковой поверхности круглого вертикального цилиндра при числе Рейнольдса 104 и значениях контактного угла смачивания 10°, 30°, 50°, 70°, 90°. Моделирование проводилось с применением метода объема жидкости (VOF) в пакете OpenFOAM. Получено, что угол смачивания оказывает значительное влияние на площадь смоченной поверхности вследствие смены режимов растекания жидкости по цилиндру. При этом выделены следующие режимы течения: сплошная пленка, устойчивый струйный режим, каскадный струйный режим и режим массивной струи. Эти режимы аналогичны режимам течения жидкости на горизонтальных трубах.

DOI: 10.31857/S0040364423030183

ВВЕДЕНИЕ

Стекающие пленки широко распространены в различных технических устройствах для интенсификации процессов теплообмена. Авторы статьи [1] выполнили обзор работ по теплообменным аппаратам в системах опреснения, где основную роль играют процессы теплообмена, связанные с характером стекания пленок. Авторы выделили три основных типа испарителей со стекающими пленками с горизонтальным или вертикальным расположением трубок и вертикальными пластинами. Отмечено, что преимуществами обладает тип испарителей с горизонтальными трубками. В соответствии с [2] определено шесть основных режимов стекания этиленгликоля по горизонтальным трубкам в диапазоне изменения значений пленочного числа Рейнольдса $Re = 2\Gamma/\mu = 1.3-64$ (где Γ – расход жидкости на единицу ширины пленки, кг/(м с); μ – динамическая вязкость, Н с/м²). Во Введении формулы и обозначения из цитируемых работ приводятся без изменений. С ростом числа Рейнольдса режим стекания жидкости изменяется от капельного через различные струйные режимы и заканчивается сплошным режимом. В [3] показано, что противоток газовой фазы изменяет числа Рейнольдса, при которых реализуются перечисленные режимы стекания пленки. Ни в одной из данных работ

не рассмотрена проблема зависимости режима стекания пленки жидкости от контактного угла смачивания.

Авторы [4] численно моделировали в пакете OpenFOAM стекание смеси воды и этиленгликоля по горизонтальным трубам в условиях полностью смачиваемой поверхности ($\theta = 0^\circ$) при $Re = 15-210$. Получены детальные характеристики основных режимов обтекания, перечисленных выше, и подтверждено влияние числа Рейнольдса на переход от одного режима течения пленки к другому.

В [5] проведено моделирование стекающей пленки воды на горизонтальных трубах при $Re = 12$ и $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ методом VOF. Для угла смачивания 10° смоделированы течения при числах Рейнольдса 12, 24 и 36 [5]. В [6] исследовано стекание раствора LiBr–H₂O по горизонтальным трубам в более широких диапазонах числа Рейнольдса ($7 < Re < 53$) и угла смачивания ($0^\circ < \theta < 120^\circ$). В обеих работах показано, что с увеличением угла смачивания характер распространения пленки изменяется от струйного к капельному режиму при фиксированном числе Рейнольдса. Влияние Re на режим течения пленки коррелирует с результатами работы [2].

В [7, 8] выполнено моделирование методом VOF пленки жидкости, стекающей по наклонной пластине с гладкой или структурированной поверхностями. В обеих работах для классификации режима растекания пленки используется число Вебера $We = \rho V^2 \delta / \sigma$, где ρ – плотность вещества, кг/м³; σ – коэффициент поверхностного натя-

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

жения, Н/м; V – начальная скорость пленки, м/с; δ – начальная толщина пленки, м. На гладкой поверхности с $\theta = 70^\circ$ при числах Вебера 0.03 [8] и 0.04 [7] реализуется капельный режим течения, при $We = 0.42$ [7], 0.8 [7, 8], 1.14 [7] – струйный режим, и при значениях этого комплекса 1.4 [8] и 1.44 [7] пленка жидкости равномерно покрывает всю рассматриваемую поверхность. Учитывая соотношение $We = ReV/\sigma$ и фиксированный угол смачивания, результаты моделирования соответствуют выводам статьи [2] по влиянию числа Рейнольдса на режим течения жидкости на горизонтальных трубах. В [9] показано, что с уменьшением контактного угла смачивания увеличивается площадь межфазной поверхности.

В работе [10] численно исследовано влияние угла смачивания на характеристики ривулета при $\theta = 20^\circ, 23^\circ, 24^\circ, 34^\circ, 60^\circ, 100^\circ$. Авторы показали, что в зависимостях толщины и контурной линии ривулета от контактного угла есть минимум при $\theta = 60^\circ$. Однако, поскольку случаи течения жидкости при $60^\circ < \theta < 100^\circ$ не исследованы, то в действительности минимумы этих характеристик могут находиться внутри указанного диапазона углов смачивания. Площадь межфазной поверхности убывает с ростом угла смачивания, включая сольвофобный ($\theta > 90^\circ$) случай стекания жидкости.

Авторы [11] изучили влияние контактного угла и свойств жидкости на течение в пленке и ривулетах на наклонной пластине с применением метода VOF. Предложена обобщающая зависимость площади межфазной поверхности от числа Капицы. С ее помощью исследователи успешно обобщили данные по углам смачивания от 20° до 80° и значениям числа Капицы 26, 783.

В [12] исследователи моделировали стекание пленки раствора глицерина (50, 80%) в воде по вертикальной плоскости в отсутствие боковых стенок при $Re = V_0\delta/\nu = 1.2\text{--}101$ (где V_0 – начальная скорость, м/с) и $\theta = 40^\circ\text{--}160^\circ$. Авторы показали каскадный характер возникновения ривулета в таких условиях. Ввиду отсутствия боковых стенок первые ривулеты появляются на левой и правой границах стекающей пленки. Если ширина пленки достаточно большая, то при дальнейшем ее стекании возникают вторая и третья пары ривулета, расположенные на одинаковом расстоянии от первой пары ривулета. Для течения пленки 80%-ного раствора глицерина при $Re = 2.92$ показано, что увеличение угла смачивания не влияет на каскадный характер образования ривулета и их количество, однако увеличивает длину ривулета.

В [13] проведено численное исследование стекания жидкого кислорода и воды в структурированных насадках при $\theta = 0.1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 70^\circ$ и $We = 4\rho V^2\delta/\sigma = 0.29\text{--}9.98$. Авторы отмечают, что при одном и том же угле смачивания ($\theta = 10^\circ$) и близких числах Вебера для воды 1.59 и жидкого

кислорода 1.83 вторая жидкость лучше смачивает поверхность насадки. Это свидетельствует о том, что число Вебера вместе с контактным углом смачивания не могут однозначно определять режим течения пленки по поверхности.

В [14] экспериментально и численно исследовано стекание пленок глицерина и силиконового масла по внешней поверхности вертикального цилиндра. Радиус цилиндра варьировался от 0.159 до 3.81 см. К сожалению, авторы не указали значения угла смачивания. При течении глицерина сплошная пленка практически не возникала, а формировались так называемые “пальцы”. В случае течения силиконового масла изначально сохранялась сплошная пленка с последующим формированием “пальцев”. При этом пальцы глицерина имели более четкие очертания, и их скорость была выше скорости пальцев силиконового масла. В свою очередь скорость фронта силиконового масла в межпальцевом пространстве была наименьшей во всем течении.

Проведенный обзор литературы показал, что, несмотря на достаточно значительное количество работ по пленкам жидкости (воды, глицерина, силиконового масла, жидкого кислорода и этиленгликоля), стекающим по боковой поверхности цилиндра, большинство исследований ограничено относительно малыми значениями числа Рейнольдса или двумя–тремя значениями угла смачивания. В таких условиях достаточно сложно выявить характерные режимы стекания пленки жидкости и описать их основные свойства. По этой причине выполнено данное системное исследование влияния контактного угла смачивания на поведение стекающей пленки смеси хладагентов R21 (мол. доля – 0.9) и R114. Данные хладагенты обладают малым поверхностным натяжением наряду с высокой смачиваемостью и малой вязкостью, что делает их удобными для экспериментального моделирования процессов теплообмена для широкого класса жидкостей, используемых в промышленности (смеси озонобезопасных хладагентов, криогенные жидкости). В будущем планируется сопоставить экспериментальные данные с результатами численного моделирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе исследовано влияние контактного угла смачивания при числе Рейнольдса 104 на характеристики растекания пленки смеси фреонов вдоль гладкого вертикального цилиндра в изотермических условиях. Результаты получены на основе трехмерного численного моделирования двухфазного течения. Основным интерес в данных условиях представляют режимы течения пленки, которые определяют площадь смоченной поверхности и интенсивность смачивания.

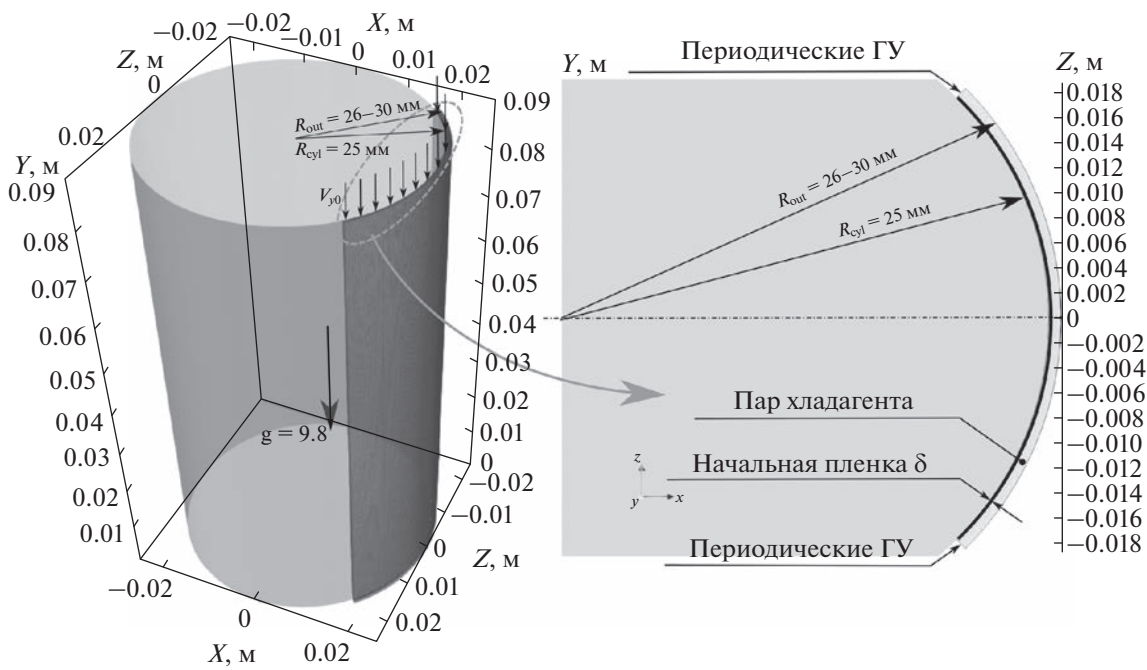


Рис. 1. Схема течения.

Рассматривалось стекание пленки смеси хладагентов R21 (мол. доля – 0.9) и R114 по четверти круглого вертикального цилиндра радиусом 25 мм и высотой 90 мм (рис. 1). Расчетный объем ограничивался мнимым цилиндром радиусом 26–30 мм в зависимости от угла смачивания. На верхней горизонтальной плоскости задавалась область с начальной толщиной пленки жидкости $\delta = 0.25$ мм и начальной скоростью $V_0 = -0.1$ м/с. С учетом свойств данной смеси фреонов (таблица) число Рейнольдса $Re = \Gamma/\nu = V_0\delta/\nu$ составляет 104, а число Вебера ($We = \rho V_0^2\delta/\sigma$) равно 0.2 (где ν – кинематическая вязкость, м²/с). Число Капицы $Ka = \sigma_l(\rho_l/\mu_l^4g)^{1/3}$ для всех случаев течения составило 3801. Безразмерный радиус цилиндра $\hat{R} = 36.9$, вычисленный по формуле $\hat{R} = R_l \times (\rho_g/\sigma\delta)^{1/3}$ [15], существенно выше критических значений, при которых кривизна цилиндра может оказывать какое-либо влияние на характеристики пленки. Здесь и далее $g = 9.8$ м/с² – константа ускорения свободного падения на Земле; c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме;

Pr – число Прандтля; σ_l – коэффициент поверхностного натяжения жидкой фазы, Н/м; ρ_l – плотность жидкой фазы, кг/м³; μ_l – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с.

Моделирование проводилось с применением метода объема жидкости (VOF) [16] в пакете OpenFOAM. Использовалось приложение «interFoam», включающее уравнения сохранения массы, импульса и переноса объема жидкости

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0,$$
$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) =$$
$$= \sigma \kappa \nabla \alpha - g \mathbf{X} \nabla \rho - \nabla P_d,$$

где $\mathbf{U}$ – вектор скорости, κ – кривизна межфазной поверхности, P_d – динамическое давление, $\mathbf{X}$ – радиус-вектор;

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha (1 - \alpha) = 0,$$

где α – объемная доля жидкости. Значение $\alpha = 1$ соответствует ячейкам сетки, полностью запол-

Свойства смеси фреонов R21 (мол. доля – 0.9) и R114 при $P = 0.2$ МПа и $T = 24.94^\circ\text{C}$

	Молярный вес, кг/(кг моль)	ρ , кг/м ³	μ , кг/(м с)	σ , Н/м	c_v , Дж/(кг К)	Pr
Жидкая фаза	109.72	1379.19	3.32×10^{-4}	1.68×10^{-2}	718	3.4

ненным жидкостью; при $\alpha = 0$ в ячейке находится только газовая фаза, и промежуточные значения этого коэффициента указывают на наличие межфазной поверхности внутри ячейки.

Связь скорости и давления устанавливалась посредством алгоритма PISO (pressure implicit with splitting of operators). Рассматривался ламинарный режим для обеих фаз, плотность жидкости задавалась постоянной.

Следующие условия заданы на границах расчетного объема:

– начальная пленка жидкости

$$y = 0.09: \mathbf{U} = (0; V_{y0}; 0), \quad \alpha = 1, \quad dP/dn = 0;$$

– поверхность обтекаемого цилиндра

$$x^2 + z^2 = R_{\text{цил}}^2: \mathbf{U} = (0; 0; 0), \\ \alpha = 0, \quad \theta = \text{const}, \quad dP/dn = 0;$$

– свободная граница моделируемого объема

$$x^2 + z^2 = R_{\text{out}}^2 \text{ и } y = 0: \\ \mathbf{U} = (0; 0; 0) \text{ или } \partial \mathbf{U} / \partial n = 0, \\ \alpha = 0, \quad P = 2 \times 10^5 \text{ Па}.$$

В начальный момент времени $t = 0$ расчетный объем имел следующие параметры: $\mathbf{U} = (-0.005, 0, 0)$, $\alpha = 0$, $P = 2 \times 10^5$ Па.

Для выполнения расчета при значениях контактного угла смачивания 10° и 30° создана гексаэдральная сетка с количеством ячеек $20 \times 500 \times 400$ ($x \times y \times z$). Применено сжатие сетки к поверхности обтекаемого цилиндра (рис. 2а). Для моделирования течений пленки при углах смачивания 50° , 70° и 90° требовалось увеличение расчетного объема и, как следствие, количества ячеек до $40 \times 500 \times 400$ ($x \times y \times z$) (рис. 2б). Шаг по времени не превышал значения $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ с. Расчетная сетка имела следующие показатели: максимальное соотношение сторон ячейки – 8.83, минимальный объем ячейки – $3.68 \times 10^{-13} \text{ м}^3$, максимальный объем ячейки – $2.92 \times 10^{-12} \text{ м}^3$, максимальная неортогональность сетки – 3.91×10^{-6} , средняя неортогональность сетки – 0, максимальная асимметрия – 0.0048.

На рис. 3 приведены результаты теста на сеточную сходимость. Проведено моделирование стекающей смеси фреонов по вертикальному цилиндру при $\theta = 30^\circ$ и $\text{Re} = 104$ с применением двух сеток: вышеописанной $20 \times 500 \times 400$ и с меньшим количеством ячеек $13 \times 400 \times 300$. Зависимости площади смоченной поверхности цилиндра от времени для обеих сеток показали хорошее совпадение между собой. Можно сказать, что дальнейшее увеличение сетки не требуется и сетка $20 \times 500 \times 400$ может быть использована для дальнейших расчетов. Сетка $40 \times 500 \times 400$ имеет

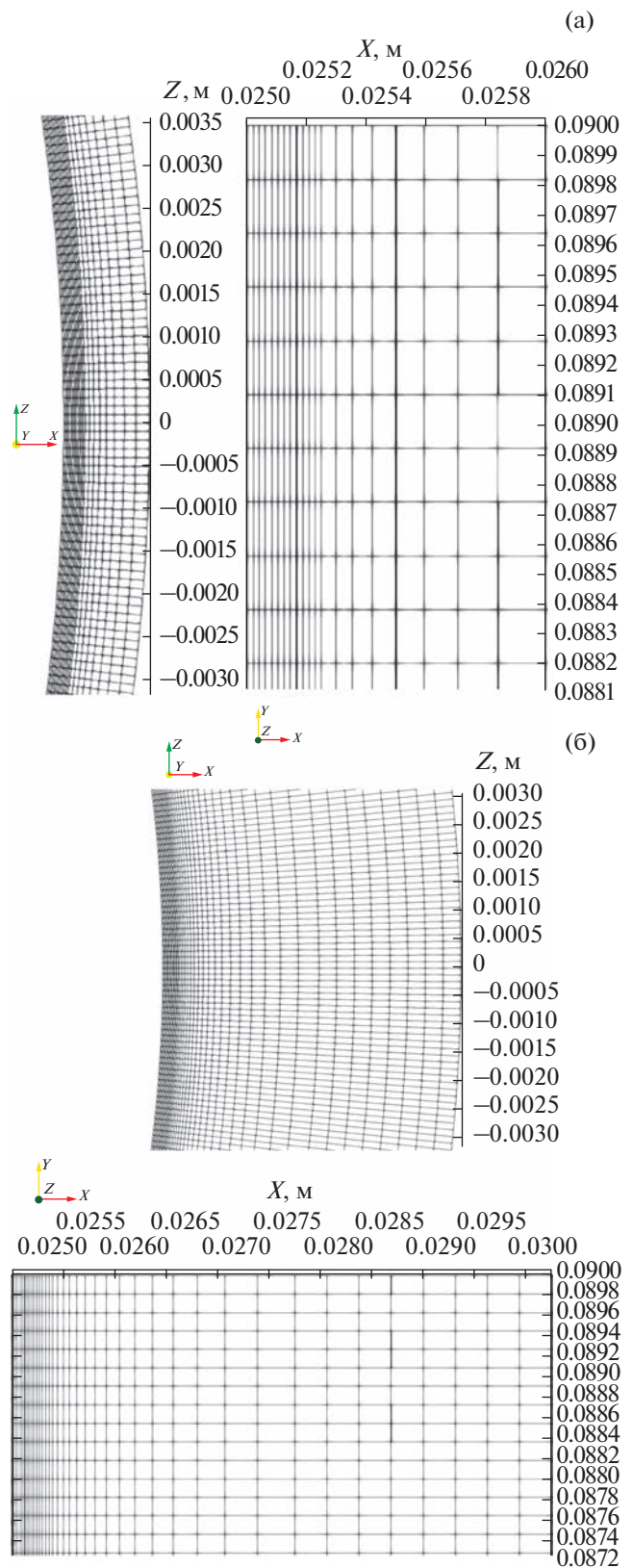


Рис. 2. Участки расчетной сетки в плоскости ZX (а) и в плоскости XY (б): (а) – для углов $\theta = 10^\circ, 30^\circ$; (б) – $\theta = 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$.

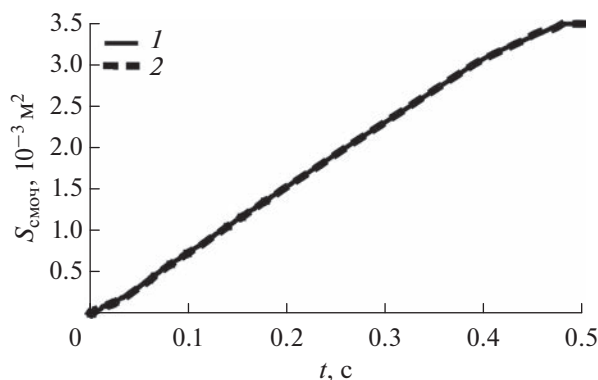


Рис. 3. Результаты теста на сеточную сходимость; сравнение площади смачивания для течения пленки жидкости при $Re = 104$ и $\theta = 30^\circ$ для двух сеток: 1 – $20 \times 500 \times 400$, 2 – $13 \times 400 \times 300$.

большее количество ячеек по координате x преимущественно за счет увеличения расчетного объема (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлена картина стекания смеси фреонов по вертикальному цилиндру при угле смачивания 10° . Здесь и далее представлены изоповерхности при $\alpha = 0.5$. Отсчет времени ведется от момента появления жидкости на верхней границе цилиндра, что соответствует началу расчета. Незначительная неравномерность на фронте смачивания появляется при $t = 0.37$ с. Далее фронт смачивания развивается в слегка волнистую ли-

нию ($t = 0.40$ с) и в таком виде достигает нижней границы цилиндра при $t = 0.45$ с. Таким образом, в вышеуказанных условиях жидкость натекает на поверхность цилиндра сплошной пленкой с почти ровным фронтом смачивания со средней скоростью 0.2 м/с, что в два раза больше начальной скорости жидкости.

На рис. 5 показана эволюция течения пленки смеси фреонов по вертикальному цилиндру при угле смачивания 30° . Жидкость натекает на цилиндр сплошной пленкой до $t = 0.22$ с. В этот момент времени во фронте смачивания появляются некоторые неравномерности, которые в отличие от течения с меньшим углом смачивания (рис. 4) развиваются в струи ниже сплошной пленки жидкости. При указанных Re и θ жидкость формирует прямые струи с острой формой фронта смачивания. Эти струи стабильны от момента появления и до достижения сплошной пленкой жидкости нижней границы цилиндра. Средняя скорость натекающей сплошной пленки жидкости меньше, чем при $\theta = 10^\circ$, и составляет 0.187 м/с. Подходы к решению проблемы неустойчивости фронта смачивания рассмотрены в работе [17] для жидких пленок, стекающих по вертикальному пористому цилиндру.

На рис. 6 показана картина стекания пленки смеси фреонов по поверхности вертикального цилиндра при $\theta = 50^\circ$. По сравнению с углом смачивания 30° неравномерности фронта смачивания сплошной пленки возникают несколько раньше ($t = 0.20$ с) и на меньшем расстоянии от верхней границы цилиндра. Эти неравномерности также

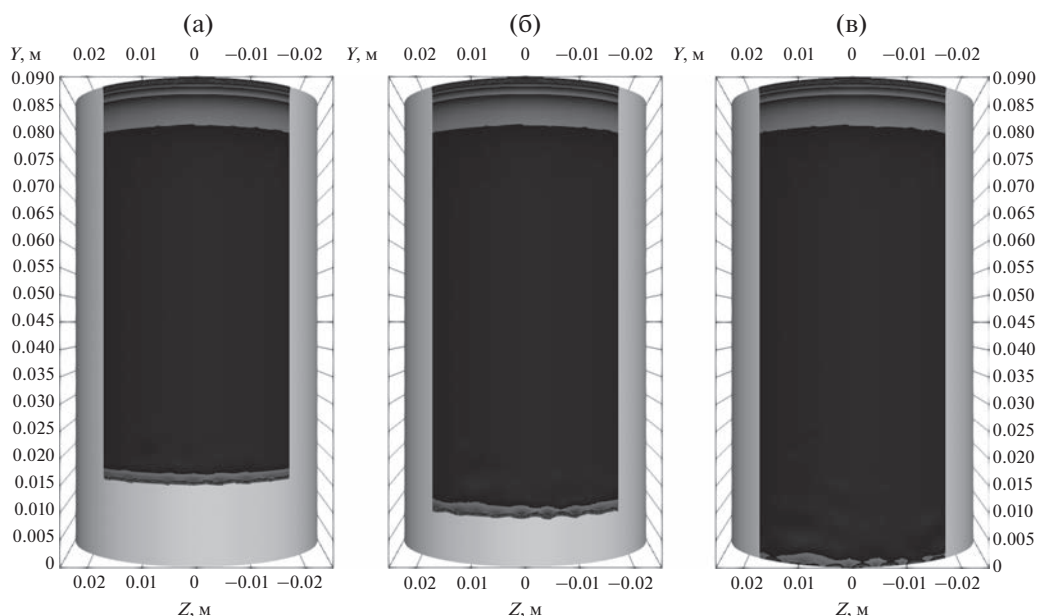


Рис. 4. Картины стекания пленки смеси фреонов ($\alpha = 0.5$) по вертикальному цилиндру при $\theta = 10^\circ$ в разные моменты времени: (а) – $t = 0.37$ с, $\bar{r} = 148$; (б) – 0.40 , 160 ; (в) – 0.45 , 180 .

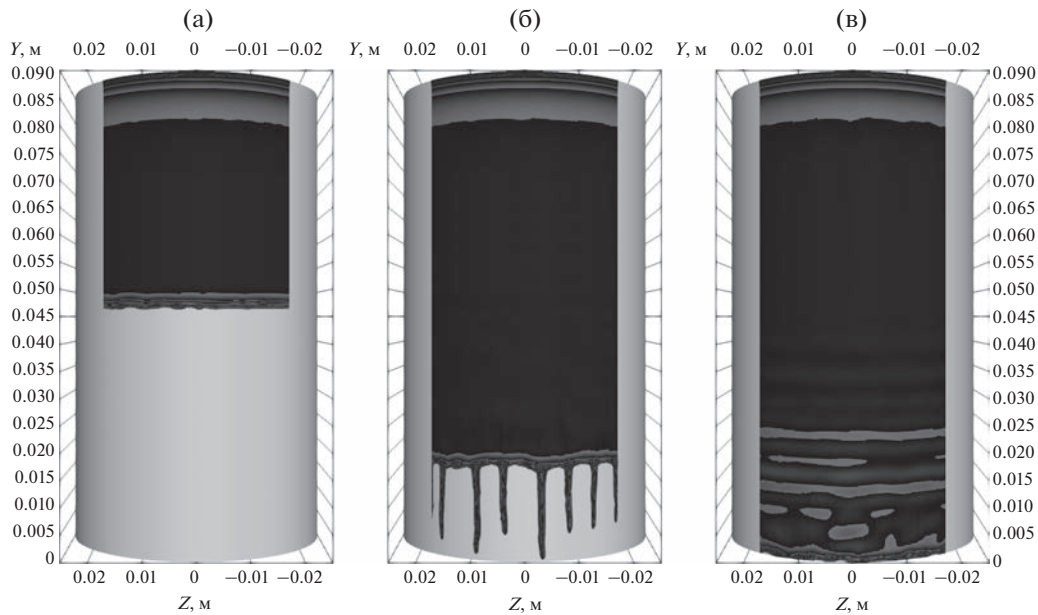


Рис. 5. Картины стекания пленки смеси фреонов ($\alpha = 0.5$) по вертикальному цилиндру при $\theta = 30^\circ$ в разные моменты времени: (а) $t = 0.22$ с, $\bar{t} = 88$; (б) $0.382, 152.8$; (в) $0.48, 192$.

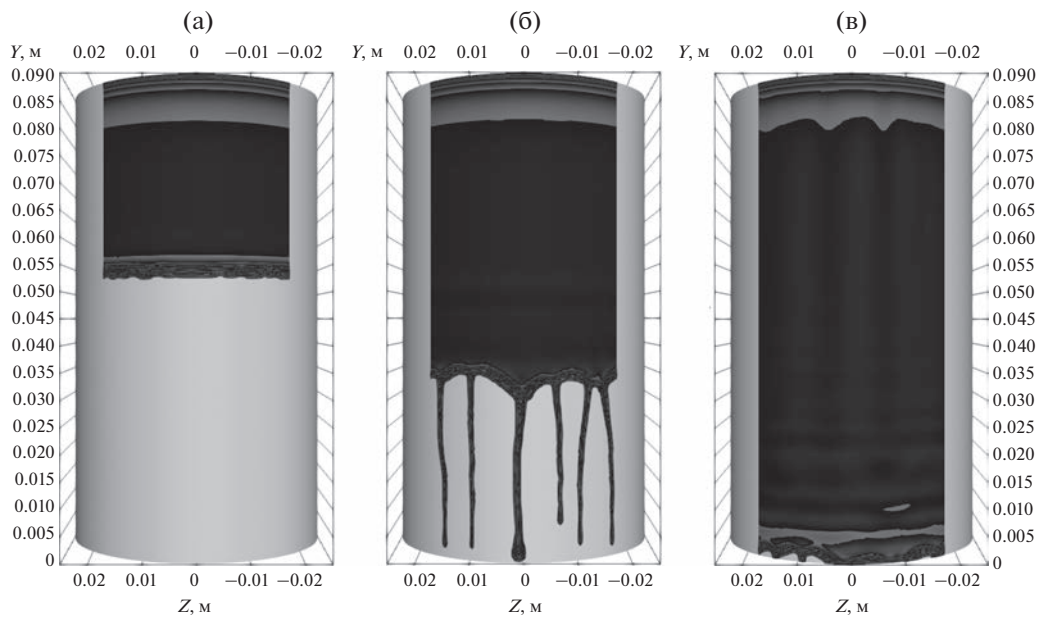


Рис. 6. Картины стекания пленки смеси фреонов ($\alpha = 0.5$) по вертикальному цилиндру при $\theta = 50^\circ$ в разные моменты времени: (а) $t = 0.20$ с, $\bar{t} = 80$; (б) $0.347, 138.8$; (в) $0.64, 256$.

дают начало струям, вытекающим из сплошной пленки жидкости. Данные струи несколько искривляются по мере движения к нижней границе цилиндра, однако остаются стабильными вплоть до достижения сплошной пленкой жидкости нижней границы цилиндра. Фронт смачивания струи имеет каплевидную, закругленную форму, а одна из струй больше остальных ($t = 0.347$ с).

На рис. 7 представлены изображения стекающей пленки смеси фреонов по поверхности вертикального цилиндра при $\theta = 70^\circ$. При этом угле смачивания продолжает уменьшаться время существования прямого плоского фронта смачивания: первые неравномерности возникают при $t = 0.19$ с на расстоянии около 33 мм от верхней границы цилиндра. Струи жидкости, возникаю-

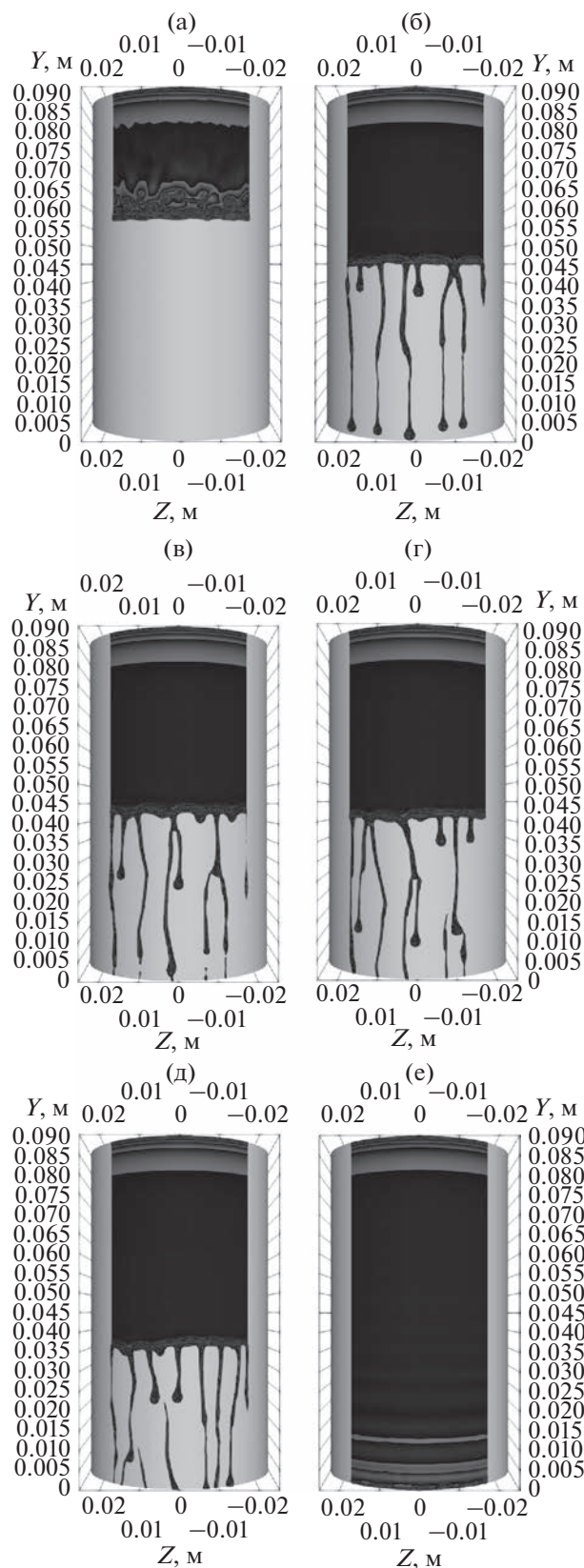


Рис. 7. Картины стекания пленки смеси фреонов ($\alpha = 0.5$) по вертикальному цилиндру при $\theta = 70^\circ$ в разные моменты времени: (а) — $t = 0.19$ с, $\bar{t} = 76$; (б) — 0.335 , 134 ; (в) — 0.37 , 148 ; (г) — 0.4 , 160 ; (д) — 0.48 , 192 ; (е) — 1.14 , 456 .

щие ниже сплошной пленки, сохраняют каплевидную форму фронта смачивания. При этом увеличивается искривление струй, приводящее к их рекомбинации между собой: распаду и объединению. Более того, с течением времени на фронте смачивания сплошной пленки возникают новые струи в промежутках между уже существующими, т.е. можно говорить о каскадном характере стекания струй. В момент времени $t = 0.335$ с возникает вторая генерация струй, а первое поколение достигло нижней границы цилиндра. При $t = 0.37$ с появляется третье поколение струй и такое поведение жидкости сохраняется вплоть до полного покрытия цилиндра сплошной пленкой. Также некоторые струи способны отрываться от основной жидкости ($t = 0.48$ с, $z \approx 0$) и самостоятельно стекать вдоль цилиндра. Сравнивая моменты времени $t = 0.37, 0.40$ с, можно заметить, что истоки некоторых струй перемещаются справа налево по фронту смачивания сплошной пленки. Средняя скорость стекания сплошной пленки при $\theta = 70^\circ$ составляет 0.079 м/с.

На рис. 8 приведены картины стекания пленки смеси фреонов по вертикальному цилиндру при $\theta = 90^\circ$. Неравномерности фронта смачивания возникают при том же времени $t = 0.19$ с, что и для угла смачивания 70° , но на меньшем расстоянии от верхней границы цилиндра, равном 28 мм. При $t = 0.25$ с существуют упорядоченные короткие каплевидные струи, которые через 0.11 с практически достигают нижней границы цилиндра, принимая сильно искривленную форму. При этом уже формируется второе поколение струй на фронте смачивания сплошной пленки, т.е. также реализуется каскадный сценарий натекания жидкости на цилиндр. Истоки струй перемещаются по фронту смачивания, что приводит к их рекомбинации и появлению более крупной струи при $t = 0.5$ с. Очевидно, что данная струя аккумулирует большой объем жидкости из вышерасположенной сплошной пленки. Это приводит к утончению остальных струй с частичным разрушением на отдельные капли жидкости. Также можно отметить, что при $t = 0.73, 1.26$ с фронт смачивания сплошной пленки практически не опускается ниже середины рассматриваемого цилиндра. Аналогичная картина течения с крупной струей возникает при стекании пленки азота по нагретой поверхности [18, 19]. Сформировавшаяся более крупная струя смещается от центра влево. Очевидно, что средняя скорость смачивания всей поверхности цилиндра при угле смачивания 90° стремится к нулю. В целом можно сказать, что при данном угле смачивания стекание жидкости по цилиндру проходит последовательно через описанные выше режимы течений при всех рассмотренных углах смачивания. При $Re = 104$ можно выделить следующие режимы стекания пленки по мере увеличения угла смачивания: сплошная

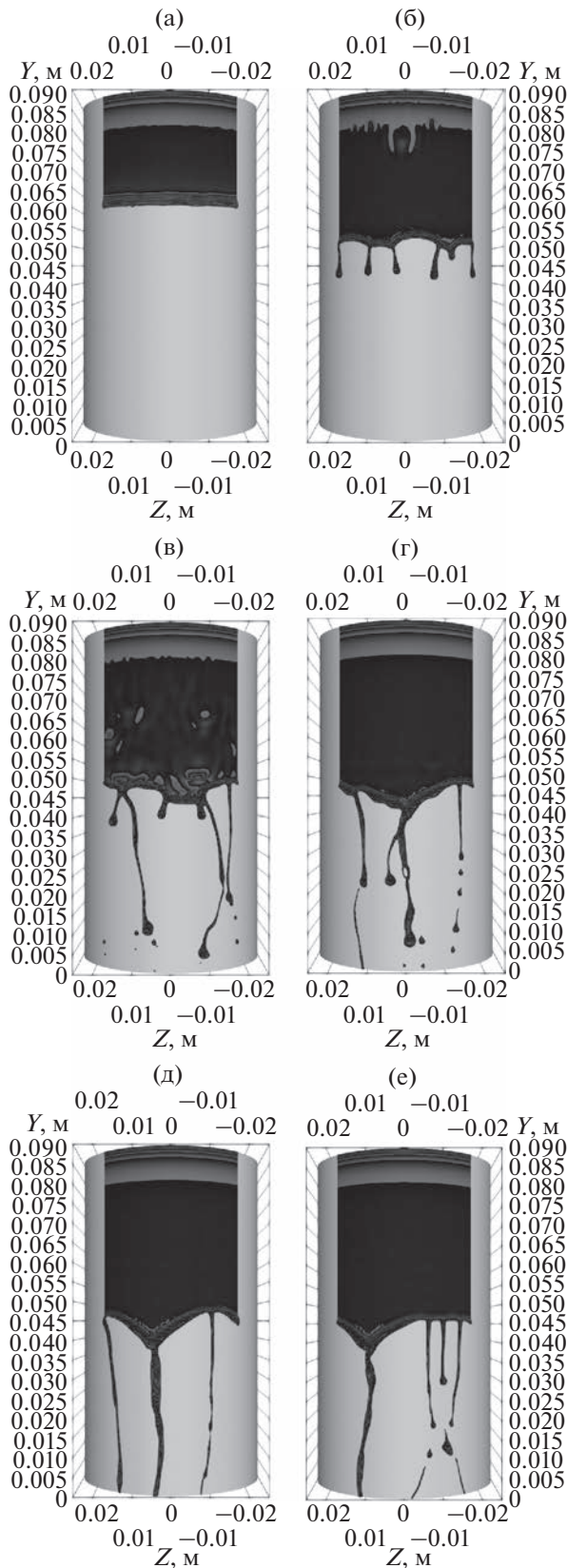


Рис. 8. Картины стекания пленки смеси фреонов ($\alpha = 0.5$) по вертикальному цилиндру при $\theta = 90^\circ$ в разные моменты времени: (а) – $t = 0.19$ с, $\bar{t} = 76$; (б) – $0.25, 100$; (в) – $0.36, 144$; (г) – $0.5, 200$; (д) – $0.73, 292$; (е) – $1.26, 504$.

пленка, стабильные струи с различным искривлением, каскадные рекомбинирующиеся струи и неполное смачивание с массивной струей.

На рис. 9 приведены зависимости площади смоченной поверхности цилиндра от времени в размерных (а) и безразмерных координатах (б) при всех углах смачивания, рассмотренных в статье. Безразмерная площадь определялась как отношение площади смоченной поверхности к четверти площади боковой поверхности цилиндра. Безразмерное время получено по начальной скорости и толщине пленки $\bar{t} = t |V_0| / \delta$. Смоченная поверхность учитывает все области контакта жидкости и поверхности цилиндра, включая капли и различные струи.

Смачивание поверхности цилиндра сплошной пленкой жидкости при $\theta = 10^\circ$ (линия 1) в зависимости от времени происходит строго линейно. Появление прямых струй с острым фронтом смачивания ввиду увеличения контактного угла (линия 2) приводит к незначительному отклонению от строго линейной зависимости, когда 90% поверхности цилиндра уже смочено. Увеличение угла смачивания приводит к уменьшению угла на

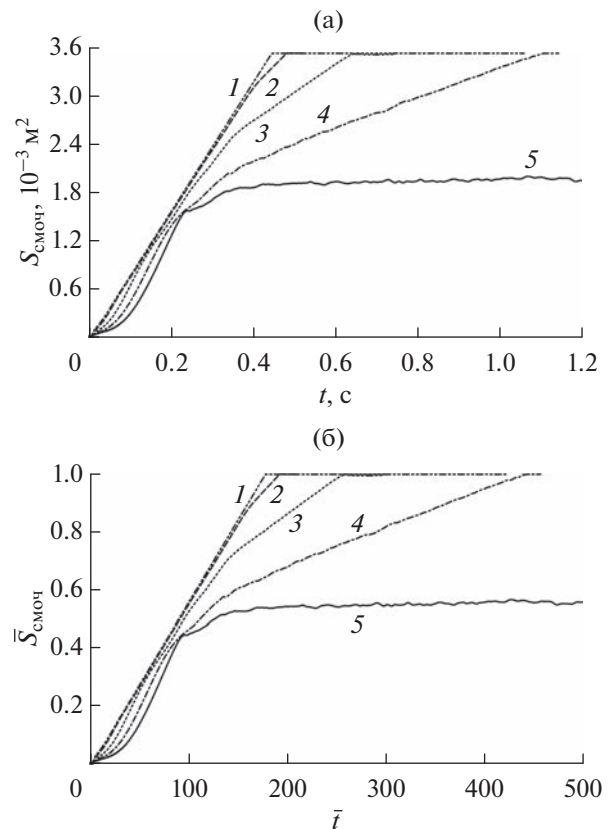


Рис. 9. Размерная (а) и безразмерная (б) площади смоченной поверхности при стекании смеси фреонов по вертикальному цилиндру: 1 – $\theta = 10^\circ$, 2 – 30° , 3 – 50° , 4 – 70° , 5 – 90° .

клона зависимостей 3 и 4 при $t > 0.4$ с. Это указывает на замедление процесса смачивания. Если при $\theta = 10^\circ$ скорость смачивания составляет 0.2 м/с, то при углах смачивания 50° и 70° возникновение струй при $t > 0.4$ с приводит к снижению скорости смачивания поверхности до 0.089 и 0.049 м/с соответственно. Увеличение угла смачивания до 90° приводит к прекращению дальнейшего смачивания поверхности цилиндра (линия 5). Максимальная достигнутая площадь смоченной поверхности составляет около 55% (линия 5, рис. 9б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением метода VOF проведено трехмерное численное моделирование стекания пленок смеси фреонов R21 (мол. доля – 0.9) и R114 на вертикальном цилиндре в изотермических условиях при углах смачивания от 10° до 90° с шагом 20° и числе Рейнольдса 104. Получены следующие результаты.

– Во всех рассмотренных случаях на начальном этапе жидкость стекает по цилиндру в виде сплошной пленки, что соответствует заданному условию на верхней границе расчетного объема. Через $t = 0.19–0.23$ с на фронте смачивания появляются каплевидные неравномерности. Дальнейшая эволюция течения определяется углом смачивания. Исключение составляет случай с $\theta = 10^\circ$, когда эти неравномерности появляются позже, при $t = 0.37$ с, и вместе со сплошной пленкой достигают нижней границы цилиндра.

– Увеличение угла смачивания приводит к появлению струй из неравномерностей на фронте смачивания. При угле смачивания 30° струи имеют острый фронт смачивания. При $50^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ фронт смачивания струй всегда имеет каплевидную форму.

– При $Re = 104$ с увеличением угла смачивания режимы течения сменяются в следующем порядке: сплошная пленка, устойчивый струйный режим, каскадный струйный режим и режим массивной струи. Устойчивый струйный режим характеризуется прямыми или слабо искривленными струями, истоки которых сохраняют свое положение на фронте смачивания сплошной пленки. В каскадном режиме струи периодически возникают на фронте смачивания сплошной пленки между истоками струй предыдущих генераций. При этом струи могут рекомбинировать между собой, а их истоки перемещаются по фронту смачивания сплошной пленки. При $Re = 104$ и $\theta = 90^\circ$ течение проходит все перечисленные режимы и формируется массивная струя, аккумулирующая до 75% жидкости из расположенной выше сплошной пленки. Это приводит к остановке фронта смачивания сплошной пленки на середине цилиндра.

В целом угол смачивания оказывает ключевое влияние на площадь смоченной поверхно-

сти вследствие смены режимов стекания жидкости по вертикальному цилиндру. Режимы течения жидкости на вертикальном цилиндре подобны режимам течения на горизонтальных трубах [2].

Исследование свойств смеси хладагентов выполнено в рамках госзадания ИТ СО РАН, численное исследование стекания жидкости финансово поддержано мегагрантом Министерства науки и высшего образования РФ (номер соглашения 075-15-2021-575).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dai Z., Zhang Y., Wang S., Nawaz K., Jacobi A. Falling-film Heat Exchangers Used in Desalination Systems: A Review // Int. J. Heat Mass Transfer. 2022. V. 185. 122407.
2. Hu X., Jacobi A.M. The Intertube Falling Film: Part 1. Flow Characteristics, Mode Transitions, and Hysteresis // Trans. ASME: J. Heat Transfer. 1996. V. 118. P. 616.
3. Li M., Lu Y., Zhang S., Xiao Y. A Numerical Study of Effects of Counter-current Gas Flow Rate on Local Hydrodynamic Characteristics of Falling Films over Horizontal Tubes // Desalination. 2016. V. 383. P. 68.
4. Karmakar A., Acharya S. Numerical Simulation of Falling Film Flow Hydrodynamics over Round Horizontal Tubes // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. V. 173. 121175.
5. Ramadan Z., Park C.W. Hydrodynamic Behavior of Liquid Falling Film over Horizontal Tubes: Effect of Hydrophilic Circular Surface on Liquid Film Thickness and Heat Transfer // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 24. 10082.
6. De Arroiabe P.F., Martinez-Urrutia A., Peña X., Martinez-Agirre M., Mounir Bou-Ali M. Influence of the Contact Angle on the Wettability of Horizontal-Tube Falling Films in the Droplet and Jet Flow Modes // Int. J. Refrigeration. 2018. V. 90. P. 12.
7. Iso Y., Chen X. Flow Transition Behavior of the Wetting Flow between the Film Flow and Rivulet Flow on an Inclined Wall // J. Fluids Eng. 2011. V. 133. 091101.
8. Sebastia-Saez D., Gu S., Ranganathan P., Papadikis K. 3D Modeling of Hydrodynamics and Physical Mass Transfer Characteristics of Liquid Film Flows in Structured Packing Elements // Int. J. Greenhouse Gas Control. 2013. V. 19. P. 492.
9. Sebastia-Saez D., Gu S., Ranganathan P., Papadikis K. Meso-scale CFD Study of the Pressure Drop, Liquid Hold-Up, Interfacial Area and Mass Transfer in Structured Packing Materials // Int. J. Greenhouse Gas Control. 2015. V. 42. P. 388.
10. Sebastia-Saez D., Gu S., Ramaoli M. Effect of the Contact Angle on the Morphology, Residence Time Distribution and Mass Transfer into Liquid Rivulets: A CFD Study // Chem. Eng. Sci. 2018. V. 176. P. 356.
11. Singh R.K., Galvin J.E., Sun X. Three-dimensional Simulation of Rivulet and Film Flows over an Inclined Plate: Effects of Solvent Properties and Contact Angle // Chem. Eng. Sci. 2016. V. 142. P. 24.

12. *Lavalle G., Sebilliau J., Legendre D.* Rivulet Cascade from Falling Liquid Films with Side Contact Lines // *Phys. Rev. Fluids*. 2020. V. 5. 124001.
13. *Gu C., Zhang R., Zhi X., Zhu S., Qiu L.* Numerical Investigation on the Flow Characteristics of Liquid Oxygen and Water in the Structured Packing // *Cryogenics*. 2020. V. 110. 103140.
14. *Smolka L.B., SeGall M.* Fingering Instability Down the Outside of a Vertical Cylinder // *Phys. Fluids*. 2011. V. 23. 092103.
15. *Mayo L.C., McCue S.W., Moroney T.J.* Gravity-driven Fingering Simulations for a Thin Liquid Film Flowing Down the Outside of a Vertical Cylinder // *Phys. Rev. E*. 2013. V. 87. 053018.
16. *Hirt C.W., Nichols B.D.* Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *J. Comput. Phys*. 1981. V. 39. № 1. P. 201.
17. *Ding Z., Wong T.N., Liu R., Liu Q.* Viscous Liquid Films on a Porous Vertical Cylinder: Dynamics and Stability // *Phys. Fluids*. 2013. V. 25. 064101.
18. *Стародубцева И.П., Павленко А.Н., Володин О.А., Суртаев А.С.* Особенности динамики повторного смачивания перегретой поверхности стекающей пленкой криогенной жидкости // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. Т. 19. № 3. С. 347.
19. *Павленко А.Н., Суртаев А.С., Цой А.Н., Стародубцева И.П., Сердюков В.С.* Динамика повторного смачивания перегретой поверхности стекающей пленкой жидкости // *ТВТ*. 2014. Т. 52. № 6. С. 886.