

УДК 658.261:621.56

DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-93-98

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКЕ С УЧЕТОМ КОНВЕКЦИИ ЛАМИНАРНО СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ

А. В. ОВСЯННИК

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Проведены теоретические и экспериментальные исследования при конденсации пара и гравитационном ламинарном течении пленки конденсата на вертикальной поверхности. Получены зависимости, которые могут быть использованы для определения коэффициентов теплоотдачи при конденсации, конвективной теплоотдаче, толщины образующегося слоя жидкости, плотности теплового потока как в расчетном так и в эксплуатационных режимах работы конденсаторов. Проверка полученных экспериментальных результатов, рассчитанных по найденным зависимостям, проведена с использованием формул Нуссельта путем сравнения данных результатов с экспериментальными исследованиями процесса конденсации озонобезопасного фреона R 404A на наклонных поверхностях с вертикальными и относительно вертикальными ребрами.

Ключевые слова: конденсация, хладагент, коэффициент теплоотдачи, фреон, эксперимент, методика.

Для цитирования. Овсянник, А. В. Гидродинамика и теплообмен при конденсации паров на вертикальной стенке с учетом конвекции ламинарно стекающей пленки / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1 (100). – С. 93–98. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-93-98

HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER DURING VAPOR CONDENSATION ON A VERTICAL SURFACE CONSIDERING CONVECTION OF A LAMINAR FLOWING FILM

A. V. OVSYANNIK

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

Theoretical and experimental studies were conducted on steam condensation and the gravitational laminar flow of the condensate film on a vertical surface. Dependencies were derived that can be used to determine heat transfer coefficients during condensation, convective heat transfer, the thickness of the liquid film, and heat flux density in both design and operational modes of condensers. The obtained experimental results, calculated using the derived dependencies, were verified using Nusselt's formulas by comparing these results with experimental studies on the condensation of ozone-safe refrigerant R-404A on inclined surfaces with vertical and relatively vertical fins.

Keywords: condensation, refrigerant, heat transfer coefficient, freon, experiment, methodology.

For citation. Ovsyannik A. V. Hydrodynamics and heat transfer during vapor condensation on a vertical surface considering convection of a laminar flowing film. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 1 (100), pp. 93–98 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-93-98

Введение

Работа конденсаторов и конденсационных устройств может протекать при различных режимах и условиях.

В расчетном режиме работы конденсатора отводимая тепловая нагрузка соответствует площади теплообмена конденсатора и весь подводимый пар конденсируется на этой поверхности. На выходе из конденсатора массовый расход конденсата равен массовому расходу пара на входе. Температура конденсата на выходе равняется температуре пара на входе и соответствует температуре насыщения.

В нерасчетном эксплуатационном режиме отводимый тепловой поток, выделяемый при конденсации пара, меньше теплового потока, соответствующего установленной площади теплообмена. В этом случае на некоторой части площади поверхности теплообмена происходит конденсация пара, а на другой части площади поверхности – переохлаждение образовавшегося конденсата за счет конвективной теплоотдачи между пленкой конденсата и поверхностью.

Существует еще один нерасчетный эксплуатационный режим, при котором отводимый тепловой поток, выделяемый при конденсации пара, будет больше теплового потока, соответствующего установленной площади поверхности конденсации. В этом случае будет конденсироваться не весь пар и часть пара будет выходить из конденсатора вместе с конденсатом в виде парожидкостной смеси. Расчетный режим нужен для выбора оборудования по определяемой площади поверхности теплообмена.

Знание параметров эксплуатационного нерасчетного режима требуется для расчета и работы приборов и средств автоматики и управления.

Целью настоящей работы является определение параметров расчетного режима при необходимой площади поверхности теплообмена и параметров, при которых наступает эксплуатационный режим с переохлаждением конденсата.

Основная часть

При работе конденсатора в расчетном режиме вся поверхность теплообмена работает на отвод теплоты конденсации и переохлаждения конденсата не происходит. В процессе конденсации расход конденсата связан с тепловым потоком и производительность конденсатора будет зависеть от количества теплоты конденсации и теплоты, идущей на переохлаждение конденсата. Во многих случаях теплота переохлаждения мала по сравнению с теплотой фазового перехода и ее можно не учитывать. Если в расчетном режиме теплоту переохлаждения не учитывают (и в некоторых эксплуатационных режимах), то в эксплуатационных режимах с резким уменьшением тепловой нагрузки и расхода конденсата ее учет вполне оправдан и необходим и тогда приемлемым будет определение теплоты переохлаждения по законам конвективного теплообмена [3–8].

С учетом теплоты переохлаждения конденсата тепловой поток, отводимый поверхностью теплообмена, будет:

$$Q_{об} = (r + c_p \vartheta_c)G, \quad (1)$$

где G – количество конденсата, образовавшегося в единицу времени, кг/с (массовый расход конденсата). Общий тепловой поток $Q_{об} = Q_{кд} + Q_{п.о}$ или общая плотность теплового потока $q_{об} = q_{кд} + q_{п.о}$. Здесь $Q_{кд}$, $q_{кд}$ – тепловой поток, Вт, отводимый при конденсации и плотность теплового потока, Вт/м² соответственно; $Q_{п.о}$, $q_{п.о}$ – тепловой поток, отводимый конвекцией при переохлаждении конденсата, Вт, и плотность теплового потока при переохлаждении конденсата, Вт/м².

В [1, 3] было получено значение коэффициента теплоотдачи, который определялся по толщине слоя ламинарно стекающей пленки жидкости. В этом случае расход жидкости будет рассчитываться [2, 3]:

$$dG = \frac{\rho^2 g \beta \vartheta_c \delta^3}{5\mu} d\delta. \quad (2)$$

На рис. 1 показаны движение пленки конденсата по вертикальной поверхности и распределение скорости и температуры в движущем слое жидкости.

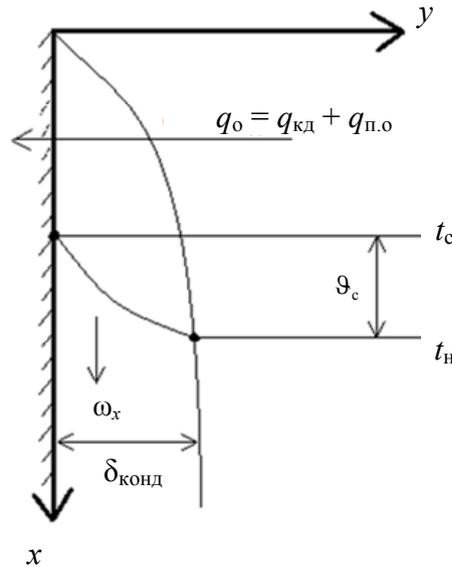


Рис. 1. Движение пленки конденсата по вертикальной поверхности

Отводимая суммарная теплота конденсации и конвекции будет:

$$dQ = (c_p + r / \vartheta_c) \vartheta_c dG = \alpha \vartheta_c dxl = \frac{\lambda}{\delta_{кд}} \vartheta_c dxl. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что

$$dG = \frac{\lambda \vartheta_c dx}{\delta_{кд} \left(c_p + \frac{r}{\vartheta_c} \right) \vartheta_c} = \frac{2\lambda \vartheta_c}{\delta_{кд} \left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c} \right) \vartheta_c} dx = \frac{2\lambda}{\delta_{кд} \left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c} \right)} dx. \quad (4)$$

Приравняв правые части уравнений (2) и (4), получим:

$$\frac{\rho^2 g \beta \vartheta_c \delta_{кд}^3}{5\mu} d\delta_{кд} = \frac{2\lambda}{\delta_{кд} \left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c} \right)} dx. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5), имеем:

$$\frac{\rho^2 g \beta \vartheta_c}{20\mu} \delta_{кд}^4 = \frac{2\lambda}{\left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c} \right)} x + C. \quad (6)$$

Постоянная интегрирования C находится из условия, что при $x = 0$ $\delta_{\text{кд}} = 0$. Отсюда $C = 0$.

Из уравнения (6) следует, что толщина слоя конденсата, гравитационно стекающего по вертикальной поверхности с учетом конвективного теплообмена и ламинарном течении:

$$\delta_{\text{кд}} = \sqrt[4]{\frac{40\lambda\mu x}{\left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c}\right)\rho^2 g\beta\vartheta_c}} = 2,5 \sqrt[4]{\frac{\lambda\mu x}{\left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c}\right)\rho^2 g\beta\vartheta_c}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет рассчитать локальное значение толщины пленки конденсата, а средняя толщина пленки определяется при $x = l$.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности при ламинарном движении пленки конденсата с учетом конвективного теплообмена пленки будет:

$$\alpha_{\text{кд}} = 0,40 \sqrt[4]{\frac{\left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c}\right)\rho^2 g\beta\vartheta_c \lambda^3}{\mu x}}. \quad (8)$$

Или в безразмерной форме:

$$\text{Nu}_x = \frac{\alpha x}{\lambda} = 0,40 (\text{Gr}_x \text{Pr})^{0,25} \left(\frac{2\mu r}{\vartheta_c \lambda}\right)^{0,25} = 0,476 \left(\text{Gr}_x \text{Pr} \frac{\mu r}{\vartheta_c \lambda}\right)^{0,25}, \quad (9)$$

где $\text{Gr}_x = \frac{g\beta\vartheta_c x^3}{\nu^2}$ и $\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$.

Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{4}{3} \alpha_{x=l} = \frac{4}{3} 0,40 \sqrt[4]{\frac{\left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c}\right)\rho^2 g\beta\vartheta_c \lambda^3}{\mu l}} = 0,533 \sqrt[4]{\frac{\left(c_p + \frac{2r}{\vartheta_c}\right)\rho^2 g\beta\vartheta_c \lambda^3}{\mu l}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{x=l}$ – местный коэффициент теплоотдачи в точке, определяемой координатой $x = l$.

Средняя теплоотдача вертикальной стенки при $t_c = \text{const}$ при ламинарном гравитационном течении пленки конденсата в критериальной форме равна:

$$\text{Nu}_l = 0,634 \left(\text{Gr}_l \text{Pr} \frac{\mu r}{\vartheta_c \lambda}\right)^{0,25}. \quad (11)$$

Все теплофизические параметры в формулах (7)–(11) принимаются для конденсата. Расчетное значение плотности теплового потока:

$$q_{\text{об}} = \alpha_{\text{ср}} \vartheta_c. \quad (12)$$

Полученные зависимости (7), (10) и (11) могут быть использованы для расчета коэффициентов теплоотдачи конденсации при гравитационном ламинарном движе-

нии пленки жидкости с постоянной температурой и толщины пленки конденсата на вертикальной поверхности. Толщина пленки жидкости или конденсата, зависящая от коэффициента теплоотдачи и теплопроводности жидкости при конвективном теплообмене на основании граничных условий третьего рода, вычисляется из зависимости $\delta_{\text{конв}} = \lambda / \alpha_{\text{конв}}$. И при конденсации паров на вертикальной поверхности толщина пленки конденсата будет определяться (также исходя из граничных условий третьего рода) той же зависимостью $\delta_{\text{кд}} = \lambda / \alpha_{\text{кд}}$. Таким образом, соотношение между коэффициентами теплоотдачи и толщиной пленки конденсата при конвективном теплообмене гравитационно стекающей ламинарной пленки равно:

$$\frac{\alpha_{\text{кд}}}{\alpha_{\text{конв}}} = \frac{\delta_{\text{конв}}}{\delta_{\text{кд}}}; \quad \alpha_{\text{кд}} = \alpha_{\text{конв}} \frac{\delta_{\text{конв}}}{\delta_{\text{кд}}}. \quad (13)$$

Для проверки полученных результатов проведены расчеты и экспериментальные исследования процесса конденсации озонобезопасного фреона R 404A на наклонных цилиндрических поверхностях с вертикальными и относительно вертикальными ребрами. Условия проведения экспериментов были следующими: плотность теплового потока относительно всей поверхности теплообмена $q_{\text{об}} = 1065\text{--}28400 \text{ Вт/м}^2$; температура насыщения $t_{\text{н}} = 15\text{--}32 \text{ }^\circ\text{C}$; площадь ребер $F_{\text{р}} = 0,025 \text{ м}^2$; площадь межреберной поверхности $F_{\text{мр}} = 0,0032 \text{ м}^2$; общая площадь оребренной поверхности $F_{\text{об}} = 0,0282 \text{ м}^2$.

Результаты исследований показали: при тепловом потоке $Q = 285 \text{ Вт}$, что соответствует плотности теплового потока $q_{\text{об}} = 9720 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha_{\text{конв}} = 6,5\text{--}7,0 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, $\delta_{\text{конв}} = 0,011 \text{ м}$; $\alpha_{\text{кд}} = 3100\text{--}3500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ и $\delta_{\text{кд}} = 2,3 \times 10^{-5} \text{ м}$. В эксперименте: $\alpha_{\text{кд}} = 4150\text{--}4680 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$; $\delta_{\text{кд}} = 2,65 \times 10^{-5} \text{ м}$.

Коэффициенты теплоотдачи и толщина пленки конденсата, определенные по зависимостям Нуссельта, составили: $\alpha_{\text{кд}} = 3600 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$; $\delta_{\text{кд}} = 1,94 \times 10^{-5} \text{ м}$.

Проведенный анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что существует три диапазона режимных параметров, в пределах которых будет иметь место расчетный режим конденсации, эксплуатационный – с переохлаждением, образующегося конденсата и эксплуатационный – с неполной конденсацией подаваемого на конденсацию пара. На основании этого выделим следующее:

- расчетный режим конденсации соответствует плотности теплового потока $q_{\text{об}} = 3000\text{--}12000 \text{ Вт/м}^2$. При этом $\alpha_{\text{конв}}$ пренебрежимо мала, а $\alpha_{\text{кд}} \approx 1500\text{--}5500 \text{ Вт/м}^2$, $\delta_{\text{кд}} \approx 1,02 \times 10^{-5}\text{--}3,0 \times 10^{-5} \text{ м}$;
- нерасчетный эксплуатационный режим с переохлаждением конденсата соответствует плотности теплового потока $q_{\text{об}} \leq 1500 \text{ Вт/м}^2$;
- нерасчетный эксплуатационный режим с неполной конденсацией подаваемого пара соответствует плотности теплового потока $q_{\text{об}} \geq 12000 \text{ Вт/м}^2$.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования конденсации пара при гравитационном ламинарном течении пленки конденсата на вертикальной поверхности показали, что полученные зависимости могут быть использованы для определения коэффициентов теплоотдачи при конденсации и конвективной теплоотдаче, толщины образующегося слоя жидкости, плотности теплового потока в рас-

четном и в эксплуатационных режимах работы конденсаторов. Представленные результаты исследований позволят определять наиболее оптимальные режимы работы конденсаторов и конденсационных аппаратов.

Литература

1. Павленко, А. Н. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении / А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, О. А. Володин. – Новосибирск : Изд-во Сиб. отд. Рос. акад. наук, 2016. – 190 с.
2. Гогонин, И. И. Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяжести / И. И. Гогонин // ИФЖ. – 2010. – № 4. – С. 821–826.
3. Гимбутис, Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости / Г. Гимбутис. – Вильнюс : Москлас, 1988. – 232 с.
4. Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films / S. Ishigai, S. Nakanisi, T. Koizumi, Z. Oyabi // Bull. JSME. – 1972. – Vol. 15, N 83. – P. 594.
5. Ягов, В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях / В. В. Ягов. – М. : Издат. дом МЭИ, 2014. – 542 с.
6. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 415 с.
7. Лабунцов, Д. А. Механика двухфазных систем / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов. – М. : Издат. дом МЭИ, 2007. – 384 с.
8. Овсянник, А. В. Гидродинамика и теплообмен при течении пленки конденсата по вертикальной поверхности / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 50–57.

References

1. Pavlenko A. N., Pecherkin N. I., Volodin O. A. *Heat transfer and crisis phenomena in flowing liquid films during evaporation and boiling*. Novosibirsk, Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk Publ., 2016. 190 p. (in Russian).
2. Gogonin I. I. *Heat transfer during boiling of a liquid in a film moving under the action of gravity*. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, no. 4, pp. 821–826 (in Russian).
3. Gimbutis G. *Heat transfer during gravitational flow of a liquid film*. Vil'nyus, Mosklas Publ., 1988. 232 p. (in Russian).
4. Ishigai S., Nakanisi S., Koizumi T., Oyabi Z. *Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films*. Bull, JSME, 1972, vol. 15, no. 83, p. 594.
5. Yagov V. V. *Heat transfer in single-phase media and during phase transformations*. Moscow, Izdatel'skii dom MEI Publ., 2014. 542 p. (in Russian).
6. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Heat transfer*. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 415 p. (in Russian).
7. Labuntsov D. A., Yagov V. V. *Mechanics of two-phase systems*, Moscow, Izdatel'skii dom MEI Publ., 2007. 384 p. (in Russian).
8. Ovsyannik A. V. Hydrodynamics and heat transfer during condensate film flow over a vertical surface, *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 4 (99), p. 50–57 (in Russian).

Поступила 19.02.2025 г.