

Обработка регистрограмм, питающих напряжений и токов при различных режимах работы сварочного инвертора Solaris MMA-208 показала, что процесс его включения и работа на холостом ходу оказывает незначительное влияние на форму кривой напряжения ( $K_U = 0,05 \%$ ), однако приводит к появлению не характерных ранее четных гармонических составляющих напряжения. Влияние рабочего режима сварочного аппарата Solaris MMA-208 на форму кривой напряжения более существенно, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения составляет  $K_U = 2,48 \%$ , и хоть не превышает  $8 \%$  нормируемых ГОСТ 32144-2013 для сетей с номинальным напряжением 380 В, но при увеличении количества подобных устройств в узле питания может привести к превышению установленной нормы.

#### Литература

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN\_50160:2010, NEQ) : ГОСТ 32144-2013. – Минск : Госстандарт, 2015. – 16 с.

УДК 536.24

### ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО РОДА

А. В. Овсянник

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

*Рассмотрена задача гидродинамики и теплообмена ламинарно стекающей пленки жидкости по вертикальной теплоотводящей поверхности. При этом определяются поля скоростей и температур при граничных условиях первого рода на внешней границе слоя жидкости. Получены уравнения для расчета толщины ламинарно стекающего слоя под действием гравитационных сил и коэффициента теплоотдачи.*

**Ключевые слова:** конденсация, пленка конденсата, коэффициент теплоотдачи, гравитационное течение, ламинарный режим, температурное поле, поле скоростей.

### HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN FLOW OF A LIQUID FILM OVER A VERTICAL SURFACE UNDER BOUNDARY CONDITIONS OF THE FIRST KIND

A. V. Ovsyannik

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

*The problem of hydrodynamics and heat exchange of a laminarly flowing liquid film over a vertical heat-removing surface is considered. In this case, the velocity and temperature fields are determined under boundary conditions of the first kind on the outer boundary of the liquid layer. Equations are obtained for calculating the thickness of the laminarly flowing layer under the action of gravitational forces and the heat transfer coefficient.*

**Keywords:** condensation, condensate film, heat transfer coefficient, gravity flow, laminar regime, temperature field, velocity field.

Задача определения гидродинамики, теплообмена и параметров движущегося слоя жидкости по вертикальной поверхности ставилась исследователями давно и решалась относительно успешно в зависимости от различных факторов, влияющих на течение слоя жидкости.

Однако при расчете толщины гравитационно стекающего слоя жидкости по вертикальной поверхности при конденсации чистых хладагентов возможен иной подход к образованию и гидродинамике гравитационно стекающего слоя конденсата. Как отмечается в [1] систематизированные данные для маловязких жидкостей при их течении по поверхностям сложной геометрии и поверхностям, имеющих различную ориентацию в пространстве, отсутствуют, либо крайне ограничены. Знание закономерностей гидродинамикитечения пленок жидкостей и их теплообмена с поверхностью, знание влияния ориентации поверхности на формирование слоя жидкости и его толщину крайне необходимо для разработки методов повышения эффективности и улучшения технических характеристик оборудования современных холодильных установок, низкотемпературных тепловых насосов, тепловых труб и т. д.

В [1] отмечается, что для построения безразмерных комплексов, характеризующих гравитационное течение пленки на гладких поверхностях, в качестве масштабов толщины слоя жидкости и скорости используются, как правило, расчетные значения в соответствии с ламинарной теорией Нуссельта. Уравнение для определения толщины слоя служит для оценки средней толщины ламинарно текущей пленки, а уравнение для локальной скорости служит для определения зависимости скорости от координаты в поперечном сечении пленки жидкости.

Значительную роль при рассмотрении вопросов гидродинамики и теплообмена стекающей пленки жидкости по вертикальным поверхностям играет определение режимов течения [2–4]. Для коротких вертикальных поверхностей течение пленки жидкости будет ламинарным и ламинарно-волновое движение не успеет развиваться из-за короткой длины пробега, следовательно, режим течения пленки – число Рейнольдса – будет гораздо меньше критического, и гидродинамика и теплообмен в пленке будут определяться гравитационными силами и будут зависеть от числа Грасгофа и Прандтля.

**Решение поставленной задачи и полученные результаты.** На основании изложенного будем полагать, что на вертикальной или наклонной продольно оребренной трубе осуществляется конденсация неподвижного пара. Поверхность ребер составляет основную площадь поверхности теплообмена конденсирующегося пара, а межреберные каналы служат не только для конденсации пара, но и для отвода образующейся жидкой фазы. Движение пленки конденсата по поверхности продольных ребер ламинарное или ламинарно – волновое (рис. 1) и тогда температура в движущемся слое конденсата изменяется по уравнению [6]:

$$\vartheta = \vartheta_c \left(1 - \frac{y}{2\delta}\right)^2, \quad (1)$$

где

$$\vartheta = t - t_n, \quad \vartheta_c = t_c - t_n; \quad t_c = \text{const},$$

$$t_n = \text{const} \quad (1a)$$

Граничные условия:  $\vartheta = \vartheta_c$  при  $y = 0$  и  $\vartheta = 0$  при  $y = \delta$ .

Кривые температур и скоростей представлены на рис. 2.

Коэффициент теплоотдачи движущегося слоя конденсата определяется уравнением теплоотдачи

$$\alpha_{\text{конв}} = -\frac{\lambda}{\vartheta_c} \left( \frac{d\vartheta}{dy} \right)_{y=0}. \quad (2)$$

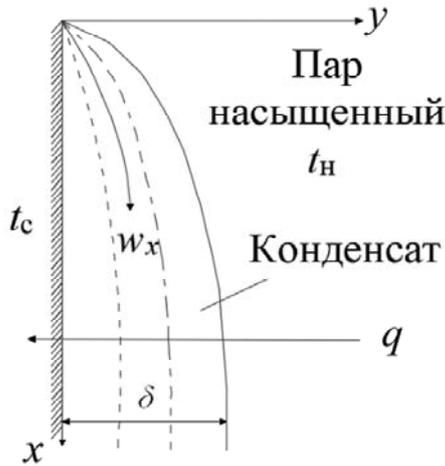


Рис. 1. Движение пленки конденсата на вертикальной поверхности

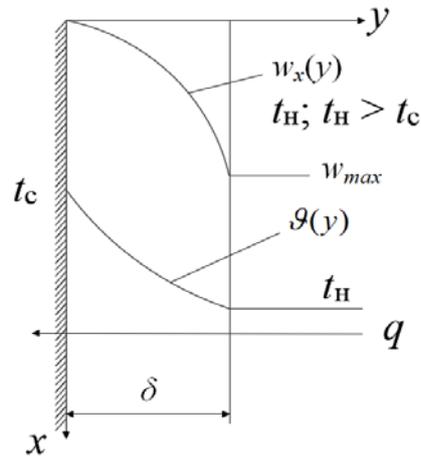


Рис. 2. Распределение температуры и скорости в пленке конденсата

$w_x, \vartheta(y)$

Из уравнения (1) следует, что

$$\frac{d\vartheta}{dy} = -\frac{2\vartheta_c}{2\delta} + \frac{2\vartheta_c}{2\delta^2} y = -\frac{2\vartheta_c}{2\delta} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)$$

$$\frac{d\vartheta}{dy}_{y=0} = -\frac{2\vartheta_c}{2\delta} = -\frac{\vartheta_c}{\delta}.$$

Подставив значение  $\left( \frac{d\vartheta_c}{dy} \right)_{y=0}$  в уравнение (2) получим [6]:

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{\lambda}{\delta}. \quad (3)$$

Толщина гравитационно движущегося слоя конденсата переменна по высоте и связана со скоростью движения для стационарного течения при условии, что движение пленки происходит только в направлении оси x и тогда уравнение движения запишется [6]:

$$\mu \left( \frac{d^2 w_x}{dy^2} \right) = -g(\rho_0 - \rho). \quad (4)$$

Так как  $\rho = \rho_0(1 - \beta\vartheta)$ , то при  $\beta = \text{const}$ :

$$\rho_0 - \rho = \rho_0 \beta \vartheta. \quad (4a)$$

Подставив значение  $\vartheta$  по формуле (1) в уравнение (4), учитывая соотношение (4a) для плотности, уравнение движения запишется [6]:

$$\left( \frac{d^2 w_x}{dy^2} \right) = - \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_c}{\mu} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^2 \quad (46)$$

или

$$\frac{d^2 w_x}{dy^2} = -D \left( 1 - 2 \frac{y}{\delta} + \frac{y^2}{\delta^2} \right), \quad (4b)$$

где

$$D = \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_c}{\mu}.$$

Распределение скоростей согласно уравнению (5) представлено на рис. 2. Максимум скорости соответствует значению

$$y = \delta; \quad w_x = w_{\max}. \quad (5)$$

В результате решения поставленной задачи толщина слоя конденсата, гравитационно стекающего по вертикальной поверхности при ламинарном или ламинарно-волновом течении будет:

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{40 \mu \lambda x}{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c}} = 2,5 \sqrt[4]{\frac{\mu \lambda x}{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c}}. \quad (6)$$

По уравнению (6) определяются локальные значения  $\delta$ . Средние значения толщины пленки могут быть определены при  $x = l$ .

Коэффициент теплоотдачи при конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности при ламинарном и ламинарно-волновом движении пленки конденсата будет:

$$\alpha_{\text{конв}} = 0,40 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu x}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) в безразмерной форме:

$$\text{Nu}_x = \frac{\alpha_{\text{конв}} x}{\lambda} = 0,40 \sqrt[4]{\frac{g \beta \vartheta_c x^3 \mu c_p}{(\mu^2 / \rho^2) \lambda}} = 0,40 (\text{Gr}_x \text{Pr})^{0,25}, \quad (8)$$

где

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

Средний коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{4}{3} \alpha_{x=l} = \frac{4}{3} 0,40 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu l}} = 0,533 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu l}}, \quad (9)$$

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

Средняя теплоотдача вертикальной стенки для  $t_c = \text{const}$  при ламинарном и ламинарно волновом гравитационном течении пленки конденсата в критериальной форме будет:

$$\text{Nu}_l = 0,533 (\text{Gr}_l \text{Pr})^{0,25}. \quad (10)$$

В результате решения задачи гидродинамики и теплообмена гравитационно стекающей пленки конденсата по вертикальной поверхности при ламинарном и ламинарно волновом режиме течения при конденсации неподвижного пара получены уравнения для определения локальных и средних по высоте стенки толщины пленки конденсата и конвективных коэффициентов теплоотдачи.

#### 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. – Изд-во Сибир. отделения Российской академии наук. – Новосибирск, 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. – Москва : МЭИ, 2014. – 542 с.
6. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – Москва : Энергоиздат, 1981. – 415 с.
7. Лабунцов, Д. А. Механика двухфазных систем / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов – Москва : МЭИ, 2007. – 384 с.

УДК 658.261:620.97

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ

А. В. Овсянник, В. П. Ключинский

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

*Представлена классификация агрегатов для синтеза полигенерационных установок, структура математической модели их расчета, а также технико-экономические показатели полигенерационных установок (установок, позволяющих получать элеткрическую энергию, теплоту, холод и диоксид углерода).*

**Ключевые слова:** полигенерация, производство диоксида углерода, утилизация низкопотенциальной теплоты.