

КАЧЕСТВЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ

ОДНИМ ИЗ СПОСОБОВ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (НИЖЕ 0 °С), ЯВЛЯЕТСЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВ С ТЕРМОСИФОННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ (ОЖ) ПО

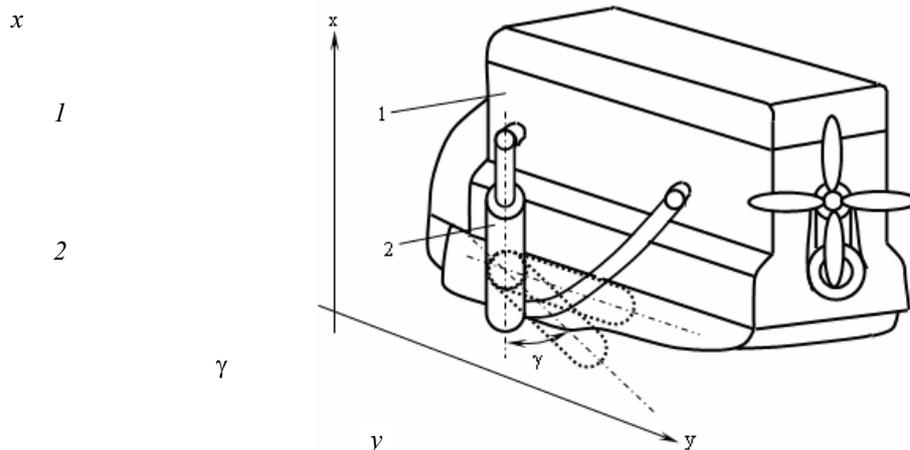


РИС. 1 РАСПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ДВИГАТЕЛЯ:
1 – ДВИГАТЕЛЬ; 2 – ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬ

ЗАМКНУТОМУ КОНТУРУ: "СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ – НАГРЕВАТЕЛЬ". ЭТИ ТЕЧЕНИЯ НАЗЫВАЕМЫЕ ТАКЖЕ ЕСТЕСТВЕННО- ИЛИ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫМИ, ВОЗНИКАЮТ ВСЛЕДСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОЦЕССАМИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПОЛЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ.

С ЦЕЛЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА НЕОБХОДИМО ОБОСНОВАТЬ СПОСОБ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ: ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ, ВЕРТИКАЛЬНОЕ ИЛИ НАКЛОННОЕ (РИС. 1).

В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ПОЛЫЙ ЦИЛИНДР С ИЗОТЕРМИЧЕСКИ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ. НАГРЕВАЕМУЮ ЖИДКОСТЬ МОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ КАК ЖИДКОСТЬ С ПОСТОЯННЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ, ЗА ИСКЛЮЧЕНИЕМ ПЛОТНОСТИ. ВЯЗКОЙ ДИССИПАЦИЕЙ МОЖНО ПРЕНЕБРЕЧЬ, ТАК КАК ПРИ РАЗОГРЕВЕ ОЖ ОТСУТСТВУЮТ БОЛЬШИЕ УСКОРЕНИЯ И СИЛЬНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПОЛЯ. ТАКЖЕ БУДЕМ СЧИТАТЬ, ЧТО В ПОТОКЕ ОТСУТСТВУЮТ ВНУТРЕННИЕ ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА.

СОГЛАСНО СКАЗАННОМУ, В ПРИБЛИЖЕНИИ БУССИНЕСКА УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ В СЛУЧАЕ ДВУМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ИМЕЮТ ВИД

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = g\beta(t - t_a)\cos\gamma - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = g\beta(t - t_a)\sin\gamma - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

*Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. В.Ф. Калинина и д-ра техн. наук. А.М. Шувалова.

где V_x, V_y – компоненты вектора скорости V ; g – ускорение силы тяжести; β – коэффициент объемного теплового расширения; t, t_a – температура пограничного слоя и температура окружающей среды; γ – угол между касательной к поверхности электронагревателя и вертикалью; P_d – давление, связанное с движением жидкости.

КАК ВИДНО ИЗ ВЫРАЖЕНИЯ (1) И (2), УГОЛ Γ ОКАЗЫВАЕТ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ.

ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЦИЛИНДРА $\Gamma = 0 \rightarrow \cos\Gamma = 1$. В РЕЗУЛЬТАТЕ НАГРЕВА ВОЗНИКАЕТ РАЗНОСТЬ ПЛОТНОСТЕЙ ОЖ МЕЖДУ ХОЛОДНЫМИ И ГОРЯЧИМИ СЛОЯМИ. ПРИ ЭТОМ ГОРЯЧИЕ СЛОИ ПОДНИМАЮТСЯ ВВЕРХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЫ В НАПРАВЛЕНИИ x . РЕШАЯ УРАВНЕНИЕ (1) СОВМЕСТНО С УРАВНЕНИЯМИ НЕРАЗРЫВНОСТИ И ЭНЕРГИИ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕННОЙ ПОДОБИЯ, УРАВНЕНИЯ МОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ В ВИДЕ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ:

$$2f'' + ff'' = 0; \quad (3)$$

$$\theta'' + \frac{\text{Pr}}{2} f\theta' = 0; \quad (4)$$

С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

$$f(0) = f'(0) = 1 - f'(\infty) = 1 - \theta(0) = \theta(\infty) = 0, \quad (5)$$

ГДЕ F – БЕЗРАЗМЕРНАЯ ФУНКЦИЯ ТОКА; Θ – БЕЗРАЗМЕРНАЯ ТЕМПЕРАТУРА.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ (3) – (5) ДАЕТ ПРОФИЛИ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ОЖ ДЛЯ ДВУХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕНОК ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ (РИС. 2)

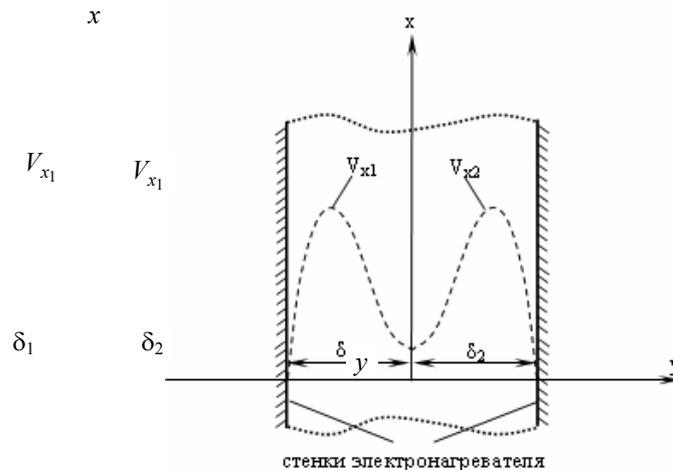


РИС. 2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ

СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ БУДЕТ ЗАВИСЕТЬ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ Δ И ЗАПИШЕТСЯ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ:

$$\bar{V}_{x_1} = \frac{1}{\delta_1} \int_0^{\delta_1} V_{x_1} dy = \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_c \delta_1^2}{4\mu}; \quad (6)$$

$$\bar{V}_{x_2} = \frac{1}{\delta_2} \int_0^{\delta_2} V_{x_2} dy = \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_c \delta_2^2}{4\mu}; \quad (7)$$

$$\bar{V}_x = \frac{\bar{V}_{x_1} + \bar{V}_{x_2}}{2}, \quad (8)$$

ГДЕ ρ_0 – ПЛОТНОСТЬ ОЖ; ϑ_c – ИЗБЫТОЧНАЯ ТЕМПЕРАТУРА; \bar{v}_x – СРЕДНЯЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ПОТОКА ОЖ ПО СЕЧЕНИЮ ЦИЛИНДРА ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ.

ПРИ НАКЛОНЕ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА ОТНОСИТЕЛЬНО ВЕРТИКАЛИ НА УГОЛ γ ПРОИЗОЙДЕТ ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИН Δ_1 И Δ_2 , А ЗНАЧИТ, ИЗМЕНИТСЯ И ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ. В ЭТОМ СЛУЧАЕ, ОПИРАЯСЬ НА УРАВНЕНИЯ (1) И (2) СОГЛАСНО ПРИБЛИЖЕНИЮ ВЛИТА [1], СКОРОСТЬ КОНВЕКЦИИ МОЖНО ВЫРАЗИТЬ, КАК

$$V_c = \sqrt{\frac{\nu^2 Gr \cos \gamma}{L^2}}, \quad (9)$$

ГДЕ ν – КОЭФФИЦИЕНТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ; Gr – ЧИСЛО ГРАСГОФА; L – ВЫСОТА ЦИЛИНДРА ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ.

СОГЛАСНО ВЫРАЖЕНИЮ (9) ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ УГЛА γ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ, ПРОИСХОДИТ СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В КОНТУРЕ "СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ – НАГРЕВАТЕЛЬ".

ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЯ ОЖ ВНУТРИ НАГРЕТОГО ЦИЛИНДРА ПРИ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ СЛОЖНУЮ КАРТИНУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ, ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОТОРОЙ КРАЙНЕ ЗАТРУДНИТЕЛЬНО. НО ЕСЛИ ВОСПОЛЬЗОВАТЬСЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ИССЛЕДОВАНИЙ [2 – 4], В КОТОРЫХ БЫЛИ РАССМОТРЕНЫ СЛУЧАИ НАГРЕВА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН КАК БЕСКОНЕЧНОЙ, ТАК И КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ПРИ НАГРЕВЕ В РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ И СИНТЕЗИРОВАТЬ ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ, ТО ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЙ БУДЕТ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ КАРТИНУ (РИС. 3).

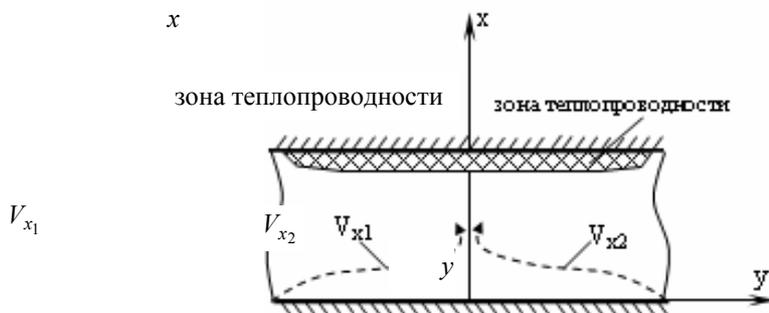


РИС. 3 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ОЖ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ

В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЦИЛИНДРА БУДЕТ НАБЛЮДАТЬСЯ УСТОЙЧИВАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ, ПРИ КОТОРОЙ БОЛЕЕ ЛЕГКИЕ СЛОИ ЖИДКОСТИ РАСПОЛАГАЮТСЯ ПОД БОЛЕЕ ПЛОТНЫМИ, ПОЭТОМУ КОНВЕКТИВНЫЕ ТОКИ НЕ ОБРАЗУЮТСЯ И ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ТОЛЬКО ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ.

В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ТЕЧЕНИЕ ОТ ОБЕИХ КРОМОК РАЗВИВАЕТСЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ К СЕРЕДИНЕ ПРИ ЭТОМ С КАЖДОЙ СТОРОНЫ ОТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ВОЗНИКАЮТ ДВА ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ. ЭТИ ТЕЧЕНИЯ СЛИВАЮТСЯ В СЕРЕДИНЕ И ОБРАЗУЮТ ВОСХОДЯЩИЙ ПОТОК.

В ЭТОМ СЛУЧАЕ ОТСУТСТВУЕТ НАПРАВЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ПОТОКА (ВЕКТОРЫ СКОРОСТЕЙ С ОБЕИХ КРОМОК НАПРАВЛЕННЫ ДРУГ НА ДРУГА). ЭТО В ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНИ СНИЖАЕТ СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ОЖ В КОНТУРЕ.

СОГЛАСНО ВЫШЕ СКАЗАННОМУ, ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА, А ЗНАЧИТ И ПРЕДУСЛОВИЯ РАЗОГРЕВА ДВИГАТЕЛЯ, НЕОБХОДИМО ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА. ЭТО ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, СО-

ГЛАСНО КОТОРЫМ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ТЕРМОСИФОННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ В 1,5...2 РАЗА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ВЛИТ ДЖ. МЕСТНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В УСЛОВИЯХ КОНВЕКЦИИ НА НАКЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ ПОДВОДЕ К НИМ ПОСТОЯННОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА // ТРУДЫ АМЕР. ОБ-ВА ИНЖ.-МЕХ, СЕР. С. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, 1969. № 4.

2 Джалурия И. Естественная конвекция: тепло- и массообмен / Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 400 с.

3 Pera L., Gebhart B., Int. J. Heat Mass Transfer. 15. 177 (1972).

4 Stewartson K., Z., Agnew. Math. Phys. 9a. 276 (1958).

КАФЕДРА "ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ"