

В.В. Киреев, С.Д. Руднев

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рассмотрено применение электростатического поля (ЭСП) как фактора интенсификации процесса работы воздушного конденсатора. Определены зависимости критериев Вебера, Фруда, Галилея, Нуссельта от напряженности поля и размера капель воды, зависимость изменения коэффициента теплоотдачи с поверхности пучка труб от скорости охлаждающей среды при поперечном обтекании. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке и конструировании воздушных конденсаторов с впрыском воды на теплообменную поверхность, конденсаторов испарительного охлаждения, аппаратов охлаждения оборотной воды, а также в оросительных камерах систем кондиционирования воздуха.

Электростатическое поле, испарительное охлаждение, критерии Вебера, Фруда, Нуссельта.

Введение

Процессы теплообмена, проходящие в природе и промышленности, чрезвычайно разнообразны. Они протекают в многокомпонентных, многофазных системах, находящихся в различных агрегатных состояниях. Течение этих неравновесных процессов часто осложняется движением компонентов и переносом энергии в форме тепла. Общая теория этих процессов достаточно сложна и требует для подтверждения различных аспектов экспериментальных исследований.

В последнее время все большее применение в промышленности находят технологические процессы, основанные на использовании воздействия электростатического поля на заряженные диспергированные частицы и материалы. Электростатическое поле как фактор интенсификации технологических процессов широко используется в промышленности. Электрические установки применяются в химической и пищевой промышленности для сушки материалов, окрашивания поверхностей, разделения сыпучих смесей на компоненты, электрокопчения, нанесения консервирующих веществ на поверхность обрабатываемых пищевых продуктов и др. [1–4]. Универсальность данной технологии состоит в том, что в природе нет таких сред и веществ, которые бы не подвергались зарядке под действием электрического поля и не являлись бы носителями зарядов, т.е. не поддавались бы силовому воздействию поля. Интерес к использованию электротехнологии особенно возрос в последнее время в связи с наступлением в ряде стран энергетического кризиса и повышением требований к охране окружающей среды. Реальность развития этого направления подкрепляется тенденцией изменения структуры энергетического баланса. Со временем большее предпочтение будет отдаваться именно электрической энергии. В этом случае электротехнология способна вывести многие традиционные процессы из эволюционного тупика [1].

Использование электрических полей в условиях промышленного производства – сложная научно-техническая задача, требующая решения следующих вопросов:

– выявление областей производства, где экономически эффективно применять электрофизические методы с учетом рационального сочетания их с тра-

диционными технологиями;

– исследование электрофизических, структурно-механических, теплофизических и других параметров охлаждающей среды и установление их взаимосвязей;

– разработка теоретических основ расчета и конструирования теплообменных аппаратов в условиях использования электростатического поля.

Силовое воздействие поля на частицы может быть использовано в воздушных конденсаторах, при распылении жидкости в теплообменных аппаратах, в камерах увлажнения промышленных систем кондиционирования воздуха. Применение электростатического поля в воздушном конденсаторе позволяет обеспечить определенные положительные изменения в интенсивности теплообмена и продолжительности процесса. Схема воздушного конденсатора, работающего в ЭСП, приведена на рис. 1.

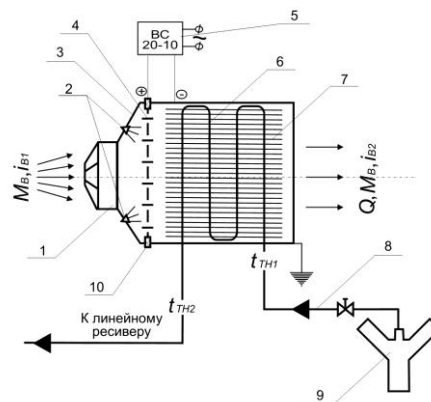


Рис. 1. Воздушный конденсатор в ЭСП: 1 – вентилятор; 2 – форсунки; 3 – кожух; 4 – высоковольтный электрод; 5 – блок питания; 6 – трубный пучок; 7 – ребра; 8 – нагнетательный трубопровод; 9 – компрессор; 10 – изолятор

Объект и методы исследований – теоретическое и экспериментальное исследование работы воздушного конденсатора в условиях использования электростатического поля.

Конденсатор работает следующим образом. При подаче на высоковольтный электрод потенциала воздух ионизируется и под действием электрического ветра движется по направлению к трубному пучку,

охлаждая его. Как показывают эксперименты, при отключенном вентиляторе скорость электрического ветра увеличивается вместе с ростом напряженности ЭСП и в области значений $E = 5,0 \cdot 10^5 \dots 1,0 \cdot 10^6$ В/м за теплообменной поверхностью конденсатора составляет 0,5...1,0 м/с. Если принять скорость воздушного потока на входе в конденсатор равной 1 м/с, то результирующая скорость электрического ветра и воздушного потока при данной напряженности поля будет равна соответственно 1,5...2,0 м/с [3, 4]. Данный эффект рекомендуется применять в конденсаторах домашних холодильников и в промышленных конденсаторах холодильных установок в зимнее время при использовании естественного холода.

Для получения интенсивного режима охлаждения при высоких температурах окружающего воздуха в конденсаторе установлены форсунки для орошения теплообменной поверхности. При впрыске воды в поток воздуха часть ее образует пленку на теплообменной поверхности конденсатора, которая, испаряясь, понижает температуру стенки. В результате улучшается процесс теплообмена. Движение струи диспергированной жидкости (СДЖ) в ЭСП может быть специально организовано путем обеспечения определенной разности потенциалов и расположения электродов в зоне охлаждения. Диспергирование жидкости в ЭСП происходит более эффективно, о чем свидетельствуют данные ряда авторов [3, 5, 7, 8, 10].

Свойства электризованных капель выгодно отличаются от свойств обычных капель. Большие капли, попадая в ЭСП, «взрываются» с образованием мелких. Образующиеся капли приобретают электрический заряд. При этом увеличивается напряженность поля, уменьшается внутреннее давление капели и, соответственно, поверхностное натяжение.

С уменьшением внутреннего давления капели увеличивается эффективность воздействия аэродинамических сил, что резко повышает силы «взрыва» капели.

Малые капли, несущие электрический заряд, являются более устойчивыми к испарению и могут существовать в ненасыщенном потоке воздуха [3]. Это важно учитывать, так как при движении капли к охлаждаемой поверхности температура потока возрастает, что приводит к росту интенсивности испарения.

Электростатическое поле интенсифицирует процесс образования положительных и отрицательных ионов. Экспериментально было показано [3], что для системы воздух – водяной пар отрицательные ионы становятся центрами конденсации при энтропии $S = 4,2$, тогда как конденсация на положительных ионах начинается при $S = 6$. Механизм образования тумана в присутствии ионов (ЭСП) и без них одинаков, но пресыщение, соответствующее давлению насыщенного пара, в присутствии газовых ионов ниже. По-видимому, ЭСП будет активизировать процесс образования тумана, что, в свою очередь, интенсифицирует процесс насыщения воздуха влагой. Это приводит к более интенсивному воздействию охлаждающей среды на поверхность пленки жидкости, стекающей по трубе.

Наличие ЭСП будет, с одной стороны, приводить к росту скорости капели, а с другой – к дефор-

мации поля скоростей полидисперсной системы капели [2, 7, 11]. Оба обстоятельства будут также приводить к усилению возмущающего воздействия капели на поверхность пленки жидкости, стекающей по трубе. Тем самым будет интенсифицироваться процесс теплоотдачи [7, 10].

Положительное воздействие ЭСП на режим охлаждения проявляется также и в изменении поверхностной энергии капели, которое может приводить к их охлаждению [7]. Этот результат, полученный на основе анализа уравнений связи поверхностной энергии, напряженности ЭСП, радиуса капели и их электро- и теплофизических характеристик, может быть положен в основу новых инженерных принципов построения охлаждающих систем.

В работе [1] также показано, что взаимодействие электрически заряженных капели в электростатическом поле приводит к их сплющиванию и возникновению градиента температуры по поверхности капли. Эти деформации нарушают теплообмен капли с окружающей средой, несколько уменьшая температуру в областях поверхности с меньшим радиусом кривизны.

Для расчета коэффициента теплоотдачи от поверхности пучка труб при охлаждении в ЭСП применяем степенную зависимость проф. Исаченко для СДЖ [6]:

$$Nu = C \cdot Re_x^m \cdot We^m \cdot Fr^n \cdot Ga_r^q \cdot Pr^x \cdot (Pr_{(ж)} / Pr_c)^{0,25}; \quad (1)$$

$$Nu = C \cdot Re^{0,5} \cdot We^{0,22} \cdot Fr^{0,75 \cos \alpha} \cdot Ga_r^{0,17} \cdot Pr^{0,5} \cdot (Pr_{(ж)} / Pr_c)^{0,25}, \quad (2)$$

где C – коэффициент, зависящий от угла наклона форсунки по отношению к охлаждающей поверхности; Re – критерий Рейнольдса; We – критерий Вебера; Fr – критерий Фруда; Ga – критерий Галилея; Pr – число Прандтля ($ж$ – для жидкости, $с$ – для струи).

Критерии будут выражаться в следующем виде:

$$We = [j_{(x)}]^2 \cdot \sigma_q \cdot \rho / R_{03}, \quad (3)$$

где $j_{(x)}$ – плотность орошения; σ_q – коэффициент поверхностного натяжения заряженной капли; ρ – плотность; R_{03} – радиус заряженной капли.

Радиус распыляемых капели в зависимости от потенциала, который подводится к штуцеру распылителя, при известной напряженности определяется по уравнению

$$R_{03} = R_0 (1 - (R_0 / 4\sigma_q) \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2), \quad (4)$$

где R_0 – средний радиус капли; ε – диэлектрическая постоянная жидкости; ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума; E – напряженность поля.

Анализ моделей и принятых в них допущений дает основание предположить, что характер процесса теплообмена в электростатическом поле будет подобным, если в качестве допущения принять, что процессы электролиза в стекающей пленке жидкости практически не влияют на теплообмен и гидродинамику течения.

Этим подчеркивается мысль о том, что ЭСП будет воздействовать только на гидродинамику течения струи диспергированной жидкости и стекающей пленки жидкости.

Охлаждение пучка труб СДЖ, помещенного в ЭСП, позволяет интенсифицировать процесс теплообмена за счет включения механизма электростатического взаимодействия капель жидкости между собой и охлаждаемой стенкой. В качестве исходных предпосылок, дополняющих модель процесса, принимаются следующие.

1. Наличие ЭСП будет приводить к еще большей деформации поля скоростей капель СДЖ – это вытекает из уравнения

$$W_{\text{эк}} = \varepsilon_0 (R_{03} \cdot E^2 \cdot [1 + 2(\varepsilon - 1 / \varepsilon + 2)] / \pi \cdot \mu_r, \quad (5)$$

где E – напряженность поля; ε – диэлектрическая постоянная жидкости; μ_r – коэффициент динамической вязкости газа, из которого видно, что с ростом R_{03} капли ее скорость в ЭСП увеличивается, т.е. крупные капли будут еще быстрее «обгонять» мелкие.

2. Наличие одноименного заряда капель будет снижать эффективность коагуляции и приводить к диспергированию крупных капель [7, 9].

3. Вектор напряженности ЭСП направлен по нормали к поверхности охлаждения. В этом случае скорость капель определяется достаточно просто по уравнению

$$W_{\text{к}} = (W_{\text{с}}^2 + W_{\text{эк}}^2 + 2W_{\text{с}} \cdot W_{\text{эк}} \cdot \cos \varphi)^{0.5}, \quad (6)$$

где $W_{\text{к}}$, $W_{\text{с}}$, $W_{\text{эк}}$ – соответственно скорость капель, результирующая в струе без ЭСП и без струи в ЭСП; φ – угол, образованный осью струи и вектором напряженности ЭСП.

4. Рассмотрена одномерная модель течения СДЖ (рис. 2) с допущением о симметричности струи.

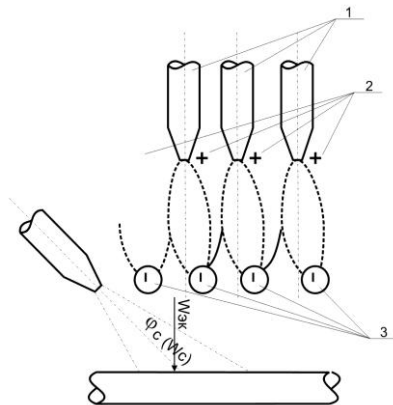


Рис. 2. Схема расположения форсунок относительно пучка труб: 1 – форсунки; 2 – электроды; 3 – трубы

Построение расчетной модели процесса охлаждения проведено следующим образом.

Учитывая, что наличие ЭСП способствует уменьшению уноса капель жидкости за поверхность охлаждения, введен коэффициент

$$\eta_{(y)} = j_{\text{э}(x)} / j_{0(x)}. \quad (7)$$

Плотность орошения при отсутствии ЭСП определяется как

$$j_{0(x)} G_{\phi} / F_x, \quad (8)$$

где G_{ϕ} – массовый расход воды через форсунку; F_x – орошаемая поверхность.

Формула плотности орошения в ЭСП $j_{\text{э}(x)}$ имеет более сложный вид и зависит от напряженности электростатического поля:

$$E = U_0 / R_1 \cdot 1_n (R_2 / R_1), \quad (9)$$

где U_0 – приложенное напряжение; R_1 – радиус электрода; R_2 – радиус трубы.

Задаваясь в первом приближении значением $\eta = 1, 2, \dots, 1, 5$, в дальнейшем уточним его величины, используя экспериментальные данные. Тогда плотность орошения в ЭСП будет определяться как

$$j_{\text{э}(x)} = j_{0(x)} \cdot \eta_{(y)}. \quad (10)$$

В дальнейших расчетах модель строится на основе уравнений с учетом корреляции скорости капель (числа Фруда) по уравнениям (5) и (6).

Для определения режима стекания пленки (псевдоламинарного или псевдотурбулентного) вычисляется критическое число Рейнольдса [6]:

$$Re_{\text{кр}} = K \chi We^{0.73} \chi 0^{-7}, \quad (11)$$

где $K = 0,31$ при $\varphi = 90^\circ$; $K = 0,22$ при $\varphi = 65^\circ$ и определяется значение координаты $X_{\text{кр}}$, соответствующее переходной границе:

$$X_{\text{кр}} = m \chi Re_{\text{кр}} / j_{\text{э}(x)}. \quad (12)$$

Анализ результатов охлаждения в ЭСП

Влияние электростатического поля на интенсивность теплоотдачи неоднозначно. Как показывает анализ полученной системы уравнений, критерии Фруда, Вебера и Галилея, входящие в уравнения (1) и (2), имеют различный характер в зависимости от напряженности электростатического поля и первоначального диаметра распыляемых капель.

Как и следовало ожидать, наибольшую «чувствительность» к действию ЭСП проявляют мелкие капли радиусом менее 10^{-5} м. С ростом напряженности ЭСП в большей степени начинают проявляться эффекты электростатического диспергирования [2, 4, 7], связанные с уменьшением сил поверхностного натяжения жидкости.

Уменьшение диаметра капель приводит к существенному росту критериев We и Fr , одновременно несколько снижается значение критерия Ga .

На рис. 3 представлены зависимости $We = f(E, R_0)$, рассчитанные по уравнениям (3), (4), (8), (10). Величины σ_q и ε определялись по уравнениям:

$$\sigma_q = \sigma - (R_0/4) \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2; \quad (13)$$

$$e = 1 + 2(e_r - 1)/(e_r + R_0), \quad (14)$$

в которых были приняты значения $\sigma = 73$ Н/м; $\varepsilon_p = 80,4$; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$; ε_p – тензор относительной диэлектрической проницаемости.

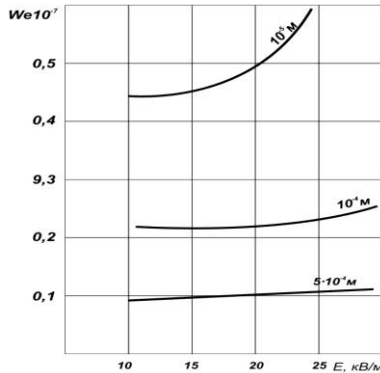


Рис. 3. Зависимость критерия Вебера от напряженности поля и размера капель

При уменьшении начального диаметра капель от 10^{-4} до 10^{-5} м число We увеличивается более чем в 2 раза. С ростом напряженности E электростатического поля изменение числа We заметно при значениях диаметра капель менее 10^{-5} м. Для более крупных капель от 10^{-4} до 10^{-3} м изменение напряженности в интервале от 5 до 35 кВ/м практически не вызывает роста числа We .

Более заметно влияние ЭСП на число Fr . На рис. 4 показаны зависимости $Fr = f(E, R_0)$. Хорошо видно, что даже незначительное изменение напряженности, в особенности для струй с большим числом мелких капель, приводит к резкому увеличению числа Fr . При увеличении напряженности до 15 кВ/м изменение числа Fr для капель диаметром менее 10^{-5} м может составить 100 % и более. Расчеты проводились по уравнениям (4), (5), (6), (11).

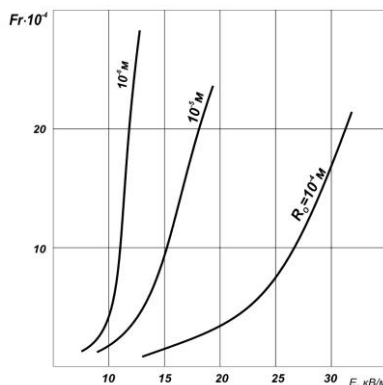


Рис. 4. Зависимость критерия Фруда от напряженности поля и размера капель

Изменение числа Ga_R (критерий Галилея для распыливаемых капель) также особенно заметно для капель малого диаметра. На рис. 5 показаны зависимо-

сти $Ga_R = f(E, R_0)$, из которых видно, что для капель различных радиусов влияние электростатического поля существенно меняется. Так, капли относительно малого радиуса в меньшей степени изменяют число Ga_R с ростом напряженности. Крупные капли с радиусом более 200 мкм даже при незначительном росте напряженности резко меняют значение Ga_R . Это можно объяснить тем, что крупные капли в меньшей степени испытывают эффект электростатического диспергирования с образованием мелких капель, в особенности в области низких потенциалов $E = 10 \dots 15$ кВ/м.

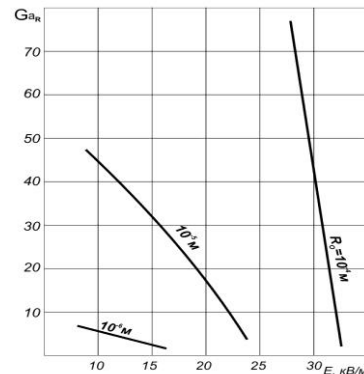


Рис. 5. Зависимость критерия Галилея от напряженности поля и размера капель

На рис. 6 показаны зависимости изменения отношения радиуса заряженной капли к радиусу незаряженной от напряженности поля. Видно, что с ростом начального радиуса капли R_0 темп падения $R_{0з}/R_0$ возрастает с увеличением E .

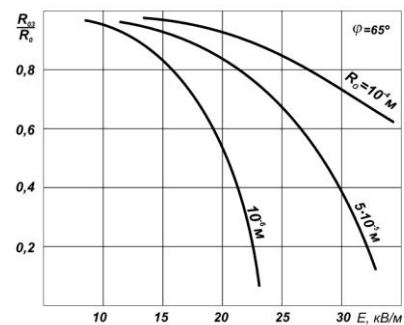


Рис. 6. Зависимость изменения относительного радиуса капель от напряженности поля и размера капель

Влияние электростатического поля на безразмерный коэффициент теплоотдачи Nu графически представлено на рис. 7. Наглядно видно, что с ростом E критерий Nu увеличивается. Таким образом, можно заключить, что увеличение скорости капель за счет их «разгона» в электростатическом поле приводит к повышению эффективности теплоотдачи.

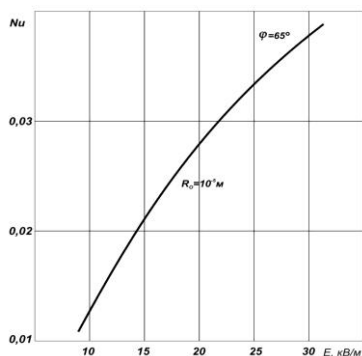


Рис. 7. Зависимость критерия Нуссельта от напряженности поля и размера капель

Не менее важное значение имеют также начальный радиус капель R_0 и угол «атаки» φ , образованный осью струи диспергированной жидкости и нормалью к поверхности (см. рис. 2). На рис. 8 представлены зависимости критерия Нуссельта от радиуса капель R_0 и угла φ . Наибольшее влияние размера капель сказывается на больших углах атаки. Так, при $\varphi = 60...90^\circ$ и уменьшении радиуса от $R_0 = 10^{-4}$ м до $R_0 = 10^{-5}$ м критерий Нуссельта возрастает более чем в два раза. При меньших значениях φ , т.е. когда ось струи становится параллельной оси трубы, изменение радиуса капель практически слабо влияет на эффективность теплоотдачи. Это можно объяснить тем, что при «атаке» струи по нормали к поверхности капли оказывают существенное возмущающее воздействие на поверхность стекающей пленки, увеличивая число и эффективность теплоотдачи.

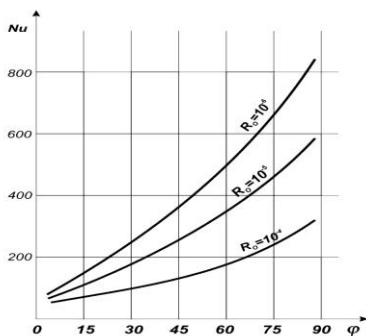


Рис. 8. Зависимость критерия Нуссельта от угла распыла охлаждающей жидкости

На рис. 9 представлены зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости охлаждающей среды и напряженности электрического поля. Наибольшего значения α достигает при скорости охлаждающей среды $V = 1,8...2,0$ м/с и напряженности поля $E = 20-25$ кВ/м.

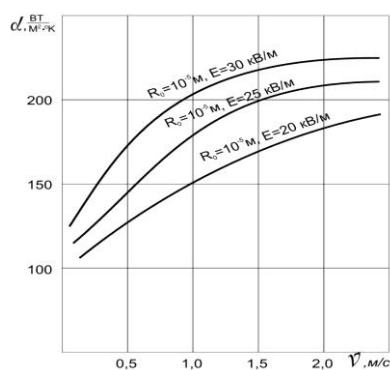


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха, напряженности поля и размера капель

На рис. 10 представлены результаты теоретического исследования зависимостей коэффициентов теплоотдачи от скорости воздуха для различных методов охлаждения.

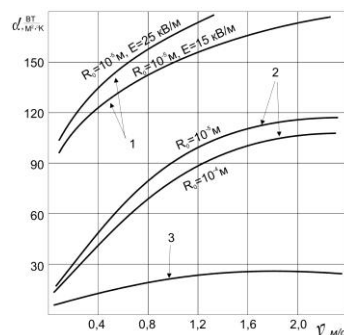


Рис. 10. Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи с поверхности пучка труб от скорости охлаждающей среды при поперечном обтекании: 1 – в ЭСП; 2 – испарительное охлаждение; 3 – воздухом

Из приведенных зависимостей видно, что наибольшего значения коэффициент теплоотдачи α достигает при испарительном охлаждении в ЭСП. Это объясняется тем, что ЭСП интенсифицирует процесс охлаждения за счет:

- ускорения движения капель;
- диспергирования крупных капель на более мелкие;
- равномерного покрытия пучка труб охлаждающей средой по всему объему аппарата.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке и конструировании воздушных конденсаторов с впрыском воды на теплообменную поверхность, конденсаторов испарительного охлаждения, аппаратов охлаждения оборотной воды, а также в оросительных камерах систем кондиционирования воздуха.

Список литературы

1. Бабакин, Б.С. Влияние электрического поля на интенсификацию теплообмена / Б.С. Бабакин, М.А. Еркин // Холодильная техника. – 1988. – № 6. – С. 41–43.
2. Бабакин, Б.С. Электротехнология в холодильной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1990. – 208 с.

3. Васяев, Б.И. Сильные электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология) / Б.И. Васяев, И.П. Верещагин, В.Е. Литвинов; под ред. В.И. Попкова. – М.: Энергия, 1979.
4. Верещагин, И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.
5. Герасимова, В.Г. Электротехнический справочник / В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 617 с.
6. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 273 с.
7. Киреев, В.В. Моделирование теплообмена в воздушно-испарительном охладителе при воздействии электростатического поля // Вестник Международной академии холода. – 2003. – № 4. – С. 10–12.
8. Пажи, Д.Г. Основы техники распыления жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 167 с.
9. Рогов, И.А. Электрофизические методы в холодильной технике / И.А. Рогов, Б.С. Бабакин, В.А. Выгодин. – М.: Колос, 1996.
10. Семенов, Е.М. Моделирование движения потока пересыщенного воздуха в электростатическом классификаторе / Е.М. Семенов и др. // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1995. – № 6.
11. Тэносеску, Ф. Электростатика в технике / Ф. Тэносеску, Р. Крамарюк; пер. с рум. – М.: Энергия, 1980. – 296 с.

ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная
техническая академия»,
665835, Россия, Иркутская обл.,
г. Ангарск, ул. Чайковского, д. 60.
Тел./факс: (3955) 67-18-32
e-mail: web@agta.ru

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

V.V. Kireev, S.D. Rudnev

HEAT EXCHANGE AT COOLING IN THE ELECTROSTATIC FIELD

Application of an electrostatic field as factor of an intensification of process of work of the air condenser is considered. Dependences of criteria of Weber, Frud, Galilee, by Nusselt from intensity of a field and the size of drops of water, dependence of change of factor of return of heat from a surface of a bunch of pipes from speed of the environment of cooling are defined at a cross-section flow. Results of the spent researches can be used by working out and designing of air condensers with water injection on a surface of heat exchange, condensers of cooling by evaporation, devices of cooling of turnaround water, and also in irrigating chambers of central airs of air.

Electrostatic field, cooling at evaporation, criterion of Weber, Frud, Nusselt.

Angarsk State Technical Academy
665835, Angarsk, Irkutsk region
Tchaikovsky street, 60
Phone/Fax: (3955) 67-18-32
e-mail: web@agta.ru

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru