

# ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

М.К. Болога, Ф.П. Гросу, А.А. Поликарпов, О.В. Моторин

*Институт прикладной физики АН Молдовы,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, [mbologa@phys.asm.md](mailto:mbologa@phys.asm.md)*

## Введение

Во многих отраслях промышленности используются процессы, сопровождающиеся пленочной конденсацией паров жидкости. Необходимость проведения исследований в этой области вытекает из потребности в эффективных и компактных теплообменниках, применение которых позволит повысить эффективность и производительность технологической системы при одновременном уменьшении ее габаритов и материалоемкости. Методы интенсификации теплообмена при конденсации традиционно делятся на пассивные и активные. К первой группе относятся методы, связанные с модификацией поверхности теплообмена, во втором же случае обычно используется то или иное внешнее воздействие. В работе рассматривается воздействие постоянного электрического поля на процесс конденсации пара внутри вертикальной трубы с целью определения оптимальных условий теплообмена и возможностей нейтрализации влияния неконденсирующегося газа.

Впервые экспериментальное исследование конденсации неподвижной паровоздушной смеси проведено Д. Отмером [1] и было обнаружено, что присутствие всего лишь 0,5% воздуха в паре приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи до 50%. Вопросы диффузии и теплопередачи в паровоздушной смеси при ее движении в трубе теоретически рассмотрены Л.Берманом [2]. Отмечается, что в конденсаторах паровых турбин влияние воздуха на теплопередачу конденсирующегося пара весьма существенно и местные коэффициенты теплопередачи могут отличаться на порядок. Исследуя естественную конвекцию паровоздушной смеси в вертикальной трубе, авторы [3] обнаружили, что при массовой концентрации воздуха 14% происходит ухудшение теплоотдачи в семь раз по сравнению с конденсацией чистого пара.

Несмотря на значительное число работ в данной области, практически отсутствуют результаты по влиянию электрических полей на конденсацию сравнительно проводящих жидкостей, в том числе обычной, водопроводной воды, в присутствии неконденсирующегося газа. С учетом сказанного ранее [4] было предпринято исследование влияния электрического поля на процесс массопереноса при конденсации водяного пара из парогазовой смеси и показано, что поле существенно влияет на процесс в сторону его интенсификации. Установлено также, что определяющую роль в этом играет, как было отмечено, коронный разряд. Данная статья является логическим продолжением работы [4] и посвящена исследованию влияния электрического поля на процесс теплообмена при конденсации. Ее главная цель во многом остается прежней – поиск новых способов компенсации негативного влияния неконденсирующихся газов на тепломассоперенос при конденсации.

## Экспериментальная часть

Процесс конденсации исследовался на экспериментальной установке, ее схема представлена на рис. 1. Конструкция принципиально такая же, как и в работе [4], с тем отличием, что охлаждение конденсатора осуществлялось не внешним обдувом комнатным воздухом, а термостатной жидкостью, в качестве которой служило трансформаторное масло. Этот способ охлаждения является более эффективным с многих точек зрения, в том числе, регулирования и проведения измерительных работ (рис. 1).

Пар поступал в нижнюю часть внутренней трубы теплообменника 1 типа "труба в трубе" длиной  $L = 80$  см и внутренним диаметром  $d = 28$  мм, где смешивался с воздухом и конденсировался на ее внутренней поверхности. Образовавшийся конденсат стекал в мерный сосуд 3. Соосно внутренней трубе установлен медный, покрытый лаковой изоляцией проволочный электрод 2 диаметром  $d_0 = 3$  мм. Вдоль провода лезвием шириной острия  $\delta \approx 10^2$  мкм наносились насечки (перфорации) в виде колец с центрами вдоль оси провода. Насечки отстояли друг от друга на расстоянии 5–6 см и наносились специально, чтобы на них вызвать коронный разряд. На провод, служащий высоковольтным электродом, подавалось постоянное напряжение от высоковольтного источника питания 4 типа АИИ-70. Заземленным электродом служила сама труба, которая заземлялась через миллиамперметр.

В межтрубном промежутке с помощью термостата осуществлялась прокачка охлаждающего трансформаторного масла. Расход масла измерялся откалиброванной диафрагмой, а его температура на входе и выходе из теплообменника – термометрами 7. Массовая концентрация воздуха в паровоздушной рабочей смеси изменялась от 0 до 70%. Расход пара измерялся по массе испарившейся воды и времени проведения эксперимента, температура поверхности трубы - с помощью термопар 5, установленных в начале, середине и конце рабочего участка. Влажность и температура пара на выходе из трубы определялись психрометром. Скорость парогазовой смеси составляла 0,05–0,50 м/с, напряженность электрического поля изменялась в диапазоне 0–20 кВ/см и ограничивалась началом пробоя межэлектродного промежутка.

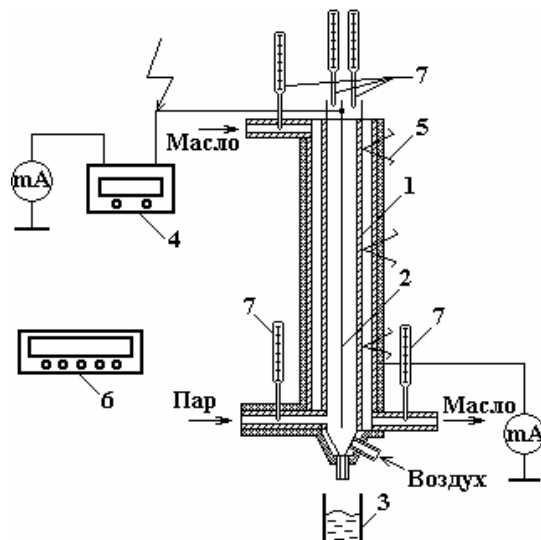


Рис. 1. Схема участка конденсации паровоздушной смеси. 1 – труба - конденсатор пара; 2 – высоковольтный электрод; 3 – сборник конденсата; 4 – высоковольтный источник; 5 – термопары; 6 – блок измерения температур; 7 – термометры

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивалась их сравнением с известными литературными результатами [5].

На рис. 2 представлена зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от концентрации воздуха при различных напряженностях электрического поля.

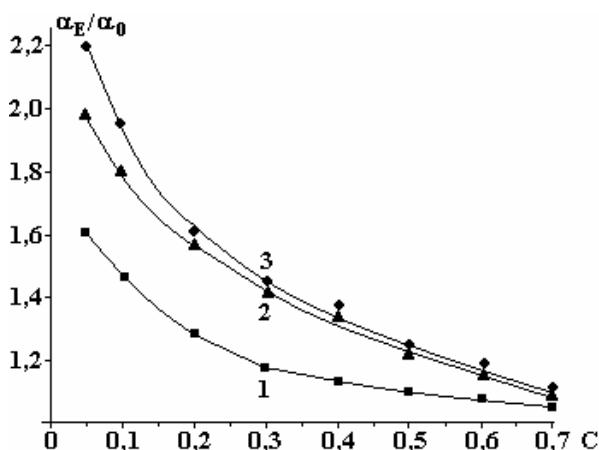


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от массовой концентрации воздуха при различных напряженностях поля, кВ/см: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20;  $v_{\text{пара}} = 0,25$  м/с:

Максимальная интенсификация составляла 2,2 и достигалась при концентрации 5%. С увеличением концентрации воздуха происходит монотонное снижение относительного коэффициента теплоотдачи во всем интервале напряженностей поля. Поведение кривых свидетельствует о том, что диффузионное термическое сопротивление неконденсирующихся газов играет важную роль даже при весьма малых их концентрациях.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости относительного коэффициента теплоотдачи в электрическом поле от приведенной скорости парогазовой смеси (рис. 3) и плотности теплового потока  $q$  (рис. 4).

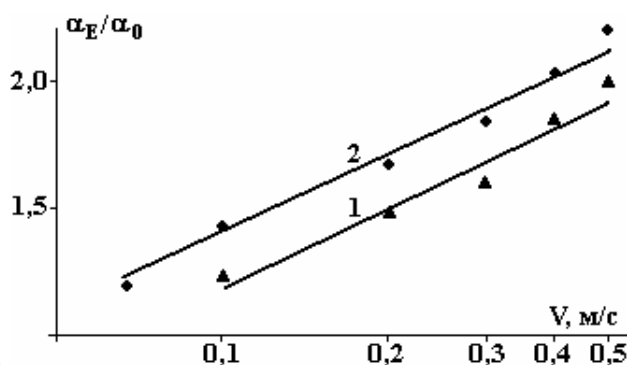


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от приведенной скорости парогазовой смеси при различных напряженностях поля, кВ/см: 1 – 15; 2 – 20;  $c = 0,05$

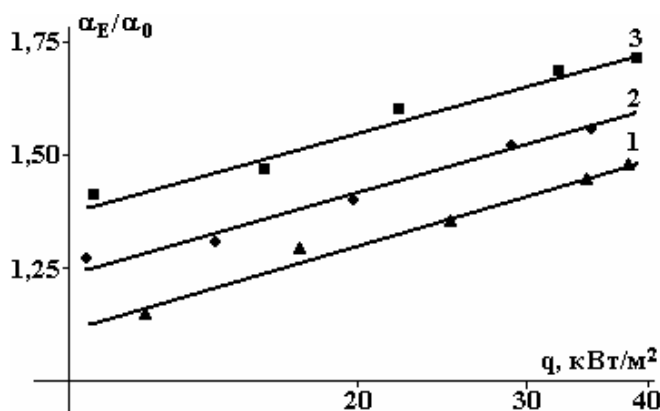


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при различных напряженностях поля, кВ/см: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20;  $v = 0,4$  м/с

Повышение скорости парогазовой смеси (рис. 3) способствует турбулизации стекающей пленки конденсата и выравниванию концентрации неконденсирующегося газа по сечению трубы, что улучшает условия теплообмена.

Рис. 4 свидетельствует о том, что рост плотности теплового потока, который регулировался температурным напором (термостатом), также приводит к увеличению относительного коэффициента теплоотдачи. Это в свою очередь означает, что классический закон Ньютона – Рихмана о линейной зависимости теплового потока от температурного перепада нарушается, впрочем, не только из-за наличия электрического поля, этот закон не соблюдается и при конденсации вообще [6].

Из рис. 2–4 видно, что с увеличением напряженности электрического поля растет и относительный коэффициент теплоотдачи. Дальнейшей задачей является физическая интерпретация полученных результатов и их обобщение методами теории подобия. Ниже ограничимся физическим обсуждением опытных данных, обобщение отложив до получения необходимых сведений по вольт-амперным характеристикам изучаемого процесса, от которых, как оказалось, существенно зависит тепломассоперенос.

#### Обсуждение экспериментальных результатов

Воздействие внешних электрических полей на тепло- и массопереносные процессы обусловлено электрогидродинамическими (ЭГД) явлениями, которые проявляются по-разному, например посредством деформаций границы раздела между фазами среды [6] или/и через электроконвективное ее перемешивание [7, 8]. В свою очередь ЭГД явления объясняются пондеромоторными электрическими силами, действующими в жидком диэлектрике, помещенном во внешнее электрическое поле. Объемная плотность этих сил дается известной формулой [9]:

$$\mathbf{f} = \rho\mathbf{E} - (E^2/2) \cdot \nabla\epsilon + (1/2) \cdot \nabla[\gamma(\partial\epsilon/\partial\gamma)E^2], \quad (1)$$

где  $\varepsilon \equiv \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_r$  – ее относительная диэлектрическая проницаемость;  $\gamma$  – механическая плотность среды; остальные обозначения общепринятые.

Первое слагаемое выражения (1) характеризует взаимодействие электрического поля с электрически заряженной средой плотностью свободных электрических зарядов  $\rho$ ; второе – обусловлено поляризацией диэлектрика и возникает лишь в неоднородной по  $\varepsilon$  среде. Третье – электрострикционное, сводящееся к всестороннему сжатию диэлектрика как целого, без того, чтобы вызвать внутренние течения (конвекцию) в нем, ввиду чего из задач ЭГД обычно выпадает [8]. В дальнейшем также пренебрегается электрострикция.

Анализ этих сил начнем с наиболее простого случая – идеальных жидких диэлектриков. В таких жидкостях если извне каким-либо способом не внесены электрические заряды, что и будем подразумевать, то первое слагаемое в (1) выпадает ввиду  $\rho \equiv 0$ . При этом будем иметь

$$\mathbf{f} \equiv \mathbf{f}_2 = -(E^2 / 2) \cdot \nabla \varepsilon.$$

Проинтегрировав это выражение по малому объему, включающему границу раздела «жидкостная пленка – пар», получим разность электрических давлений по разные стороны границы

$$\Delta P_e = [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) D^2] / (2\varepsilon_1 \varepsilon_2), \quad (2)$$

вызывающую неустойчивость пленки и ее деформацию, вплоть до разрыва, что в конечном счете приводит к усилению тепломассопереноса. Этот физический механизм воздействия электрического поля на процесс конденсации положен в основу многих теоретических исследований, например [10, 11]. И если в случае очень высокоомных жидкостей такая трактовка влияния поля на конденсацию представляется приемлемой, то для реальных жидкостей, в которых электропроводность хоть и мала, но все же отлична от нуля ( $\sigma \neq 0$ ), она представляется неправомерной. Речь идет о жидкостях, для которых отношение времени их релаксации  $\tau \equiv \varepsilon / \sigma$  к характерному времени изменения внешнего поля  $t_*$  (период колебания) не более единицы, то есть  $\tau / t_* < 1$  [8]. В случае постоянных электрических полей сюда попадают практически все диэлектрические жидкости технической чистоты, в том числе трансформаторное масло, не говоря о воде, даже химически чистой. Более того, по параметру  $\tau$  воду вообще нельзя рассматривать с позиций идеальных диэлектриков и в переменных полях промышленной частоты и выше, вплоть до сотен килогерц. Во всех этих случаях в силу вступает новый фактор воздействия поля, чисто кулоновской силы – первого слагаемого (1). Плотность свободных объемных зарядов пропорциональна плотности электрического тока  $\mathbf{j}$  и равна [8]:

$$\rho = \mathbf{j} \cdot \nabla \tau. \quad (3)$$

Из этой формулы, аналогично выводу формулы (2), следует выражение для поверхностной плотности свободных электрических зарядов  $\sigma_*$  на границе раздела «жидкостная пленка – пар»:

$$\sigma_* = j_n \cdot (\tau_1 - \tau_2), \quad (4)$$

где  $j_n$  – нормальная составляющая плотности тока сквозной проводимости; индексы «1» и «2» относятся к газу и жидкости соответственно. В силу непрерывности плотности тока ( $j_{n1} = j_{n2}$ ) для напряженностей поля внутри конденсатной пленки  $E$  и в паровоздушной смеси  $E_1$ , имеем соотношение (распределение по закону «тока»)

$$E_2 / E_1 = \sigma_1 / \sigma_2, \quad (5)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – соответствующие удельные электропроводности. В случае воды это отношение на целые порядки меньше единицы, поэтому поле в жидкостной пленке практически равно нулю ( $E_2 = 0$ ), а поверхностная сила, действующая на пленку, согласно (4), (5) определится, как и для поверхности заряженного проводника, равенством [9]:

$$F_n^* = \frac{1}{2} \sigma_* \cdot E_{n1} = \frac{1}{2} \varepsilon_1 \cdot E_{n1}^2, \quad (6)$$

где верхний символ при силе  $F_n^*$  указывает на чисто кулоновский ее характер. С учетом  $\epsilon_1 \ll \epsilon_2$  тот же результат получается и из (2). Следовательно, с точки зрения действия поверхностных сил «диэлектрическая» и «кулоновская» концепции приводят практически к одному и тому же эффекту, и, казалось бы, ситуация неоднозначная – нельзя идентифицировать эти концепции. Однако это не так. Существенная разница между «диэлектрическим» воздействием поля и «кулоновским» должна наблюдаться при переходе от постоянного поля к переменному. А именно – переменное поле при  $\tau/t_* > 1$  почти равносильно невозможности накопления свободных объемных зарядов ( $\rho \approx 0$ ), то есть отсутствию чисто кулоновского взаимодействия. Если к тому же поле еще и однородное, то даже в неоднородной по  $\epsilon$  среде ЭГД явления не должны вообще наблюдаться. Если поле постоянное ( $\tau/t_* \ll 1$ ), то обычно доминируют ЭГД явления, обусловленные объемными свободными зарядами ( $\rho \neq 0$ , по формуле (3)). Таким образом, отсутствие ЭГД эффектов в переменных полях, с одной стороны, и их наличие в постоянных, с другой, – верный признак того, что за эти эффекты ответственны силы чисто кулоновского характера ( $\rho E$ ).

Особый случай – резко неоднородное поле, когда возможно возникновение коронного разряда, который коренным образом меняет картину взаимодействия поля со средой. Дело в том, что этот тип разряда, как известно [12], всегда служит источником униполярной электризации среды и, как следствие, явления электрического ветра (ЭВ). На наш взгляд, именно коронный разряд в основном положительно влияет на процессы теплопереноса при конденсации. Влияние это осуществляется, во-первых, за счет зарядки границы раздела «пленка-пар» и ее деформации вплоть до разрыва силами (6) и, во-вторых, за счет турбулизации парожидкостной среды в целом, электрическим ветром. В пользу последнего предположения говорит и тот факт, что согласно наблюдениям [4] воздействие электрического поля на конденсацию имело место после возникновения высоковольтного разряда (при  $E \geq E_{кр} \approx 6$  кВ/см), который был коронным, ибо возникал от резких неоднородностей поля (перфораций), как и в данном рассматриваемом случае.

Электрический ветер в газах, который возможен и в диэлектрических жидкостях, характеризуется следующим критерием подобия [8]:

$$\text{Re}_E \equiv \left( \frac{j\gamma l^3}{k\eta^2} \right)^m, \quad (7)$$

где  $j$  – плотность тока коронного разряда;  $\gamma$  – по-прежнему плотность среды (смеси газов);  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $l$  – характерный размер коронирующей области;  $k$  – коэффициент подвижности ионов знака коронирующего электрода. Как показано в [13, 14], показатель степени  $m$  заключен в пределах  $1 > m > 0,5$ , причем убывает от единицы до 0,5 по мере развития электрического ветра от ламинарного режима до турбулентного. Выражение (7), названное впоследствии «электрическим» числом Рейнольдса [14], успешно применено для обработки экспериментальных данных по теплоотдаче коронирующей проволоки к различным газам (воздух, углекислый газ, аргон, гелий) при различных давлениях (от 0,1 до 20 ат) [15]. Недавно оно использовано и в целях обобщения данных по влиянию электрического поля на массоперенос при конденсации [4]. Представляется вполне естественным привлечение числа (7) и для обобщения экспериментальных результатов данной работы, что предусматривается в перспективе. Более того, на основе (7) представляется возможным физическое объяснение многих фактов, установленных при исследованиях теплопереносных процессов под воздействием электрических полей.

Прежде всего заметим, что в результате ионизации паровоздушной среды в ней появляется множество новых центров конденсации в виде ионов, которые, будучи сольватированы полярными молекулами воды, укрупняются в массе и размерах. В литературе по аэроионам встречаются указания о том, что в среднем один положительный аэроион сольватирован 12 полярными молекулами воды. К этому выводу можно придти и из геометрических соображений, считая ионы и молекулы воды сферами одинакового диаметра. Возрастание размеров и массы носителей зарядов может привести к далеко идущим последствиям, так как это может существенно сказаться на плотности среды и коэффициентах переноса. Чтобы сказанное стало яснее, вычислим комплекс физических величин (обозначим его буквой  $\psi$ ), входящих в состав критерия подобия (7) и характеризующих сугубо физические свойства среды:

$$\psi \equiv \gamma/k\eta^2. \quad (8)$$

Полагая паровоздушную смесь идеальным однородным газом, подставим в (8) для плотности, коэффициента вязкости и подвижности выражения

$$\gamma = \frac{pM}{RT}; \eta = \gamma \cdot D; k = \frac{q_i DN_A}{RT}; D = \frac{1}{3} \cdot \bar{u} \cdot \bar{\lambda}; \bar{u} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}; \bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2\pi d_*^2 n}},$$

где первое уравнение – Клапейрона-Менделеева; второе и третье – связывающие коэффициенты вязкости  $\eta$  и подвижности ионов  $k$  с коэффициентом диффузии  $D$ ;  $q_i$  – заряд ионов знака коронирующего электрода; четвертое равенство – формула для коэффициента диффузии; последние две формулы – это формулы для средней квадратичной скорости  $\bar{u}$  и для средней длины свободного пробега  $\bar{\lambda}$  молекул;  $d_*$  – эффективный диаметр молекул;  $n$  – их концентрация;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M$  – молярная масса;  $N_A$  – число Авогадро. В результате, учитывая еще известную связь между плотностью  $\gamma$  и концентрацией частиц  $n$ , получим

$$\psi \equiv \gamma/k\eta^2 = \frac{18\pi^3 N_A^2}{q_i} \cdot \frac{p^2}{R^2 T^2} \cdot \sqrt{\frac{2M}{3RT}} \cdot d_*^6. \quad (9)$$

Формула (9) отражает влияние совокупности физических параметров на рассматриваемый процесс, в частности давления  $p$  и температуры  $T$ . Видно, что рост давления в системе должен в значительной степени благоприятствовать интенсификации процесса теплопереноса. Противоположное действие на данный процесс должна оказывать температура.

Однако особенно бросается в глаза очень сильная зависимость параметра  $\psi$  от эффективного диаметра молекул:  $\psi \sim d_*^6$ . Согласно формуле (7) это означает, что только за счет эффекта сольватации ионов, то есть роста параметра  $\psi$  (при заданной силе тока), из-за роста  $d_*$  должно наблюдаться весьма существенное усиление теплопереноса при конденсации в электрическом поле. Так как сама формула (9) относится к идеальному газу, то сделанные выводы, очевидно, в значительной степени следует рассматривать как качественные. Более того, нами еще не учтено, что паровоздушная смесь в действительности будет содержать аэрозольные частицы в виде микроскопических капель (на центрах конденсации), что в еще большей степени усложнит проблему. При этом отдельное рассмотрение требует вопрос о влиянии самого поля на процесс конденсации, то есть речь идет о влиянии поданного напряжения, силы тока и конфигурации поля.

Таким образом, вырисовывается сложная картина взаимодействий электрического поля с дисперсной паровоздушной средой, требующая систематических, глубоких и всесторонних исследований, которые представляются актуальными на глобальном уровне.

### Выводы

Экспериментально подтверждена возможность существенной интенсификации теплообмена в электрическом поле за счет турбулизации пленки конденсата и уменьшения диффузионного сопротивления переносу пара.

Достигнуто двукратное увеличение теплообмена.

Полученные результаты объясняются на основе гипотезы о главной роли в ЭГД взаимодействиях коронного разряда и его последствиями. Однако требуются дальнейшие исследования как в экспериментальном плане, так и теоретическом.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании компактных конденсаторов пара, в том числе электрогидродинамических генераторов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Othmer D.F. The Condensation of Steam. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1929, **21**(6), 577–583.
- Берман Л.Д. Тепло- и массоотдача при конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов. *Известия ВТИ*. 1947, (8), 11–18.
- Vierow K., Schrock V.E. Condensation in a Natural Circulation Loop with Noncondensable Gases Part I. *Heat Transfer, Proc. of International Conference on Multiphase Flow '91 (Japanese Society of Multiphase Flow, ANS)*, Tsukuba, Japan, 1991. P. 183–186.
- Bologa M.K., Grosu F.P., Polikarpov A.A. and Motorin O.V. Condensation of a Gas-Vapor Mixture under the Conditions of Corona Discharge. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011, **47**(4), 340–343.

5. Берман Л.Д. Экспериментальные исследования конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов. *Теплоэнергетика*. 1957, (6), 43–50.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. М., 1975. 380 с.
7. Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. М.: Наука, Физматгиз, 1979. 319 с.
8. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. М.: Физматгиз, 1959. 532 с.
10. Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С.М. *Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле*. Кишинев: Штиинца, 1987.
11. Болога М.К., Коровкин В.П., Савин И.К. *Двухфазные системы жидкость-пар в электрическом поле*. Кишинев: Штиинца, 1992. 243 с.
12. Капцов Н.А. *Электрические явления в газах и вакууме*. М.: Гостехиздат, 1950.
13. Bologa M., Cojuhari I., Grosu F.P. Electroconvectia ca bază a tehnologiilor electrohidrodinamice. *Electrotehnologii*. 2002, 2(3), 95–119.
14. Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроизоотермическая конвекция и ее роль в процессе теплообмена. *Электронная обработка материалов*. 2008, 44(3), 25–35.
15. Grosu F.P., Bologa M.K. and Bologa Al.M. Peculiar Features of Heat Transfer under Conditions of Electric Convection. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010, 46(4), 324–335.

*Поступила 25.04.11*

### **Summary**

The study has been carried out on the heat transfer processes at the condensation of vapor-air mixture in the presence of an electric field. It is established that even very small additions of air impair vapor condensation, hence, the heat transfer. It is shown that application of an electric field can be an effective factor in eliminating negative effects of the presence of air on the process of condensation. It has been found out that corona discharge, specially created by means of notches on the surface of the inner electrode, and its effects are the main actors in enhancing condensation. The experimental dependences are obtained of the relative heat transfer coefficient under condensation as a function of the air concentration, of the flow rate of the vapor-air mixture delivery into the vapor condenser, and the specific heat flow at different electric field intensities. The results are accounted for by the electrical charging of the medium in the corona discharge area, by the convective stream and by the charging of "vapor-liquid" interface. A formula has been deduced, according to which the process of condensation is strongly influenced by the effective diameter of molecules ( $\psi \sim d_*^6$ ). This effect can be more pronounced in the electric field due to the ion solvation by water molecules, which results in a new mechanism for the intensification of the condensation process in an electric field.

---