

## КОНДЕНСАЦИЯ ПАРОВАЗОВОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ КОРОННОГО РАЗРЯДА

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)

\*\*Государственный аграрный университет Молдовы,  
ул. Мирчешть, 44, г. Кишинев, MD-2049, Республика Молдова, [f.grosu@mail.ru](mailto:f.grosu@mail.ru)

### Введение

Вопросы влияния электрических полей на процессы конденсации достаточно подробно представлены в работе [1–3]. Основное внимание уделяется влиянию поля на границу раздела конденсатной пленки, ее деформацию и разрушение. Физическая трактовка явлений осуществлялась на представлениях идеальных диэлектриков (силы  $f \sim E^2 \cdot \nabla \epsilon$ ) [4] без учета возможностей появления в среде свободных электрических зарядов ( $\rho \neq 0$ ). Такой подход можно считать оправданным, поскольку рассматривались высокоомные жидкие диэлектрики типа фреона и практически однородные поля. Однако отсутствуют данные о влиянии электрических полей на конденсацию паров сравнительно электропроводящих жидкостей, например воды, когда следует считаться с ее электропроводящими свойствами и возможностью электрической зарядки среды в целом. Этот пробел в определенной степени восполнен в работе [5], в которой приведены результаты экспериментальных исследований влияния электрического поля на процесс конденсации водяного пара из паровоздушной смеси.

Опыты проводились на экспериментальной установке, представляющей собой конденсатор пара в виде вертикальной трубы, вдоль оси которой натянута медная проволока с насечками в виде колец, на ее лаковой изоляции среднее расстояние между насечками составляло 5 мм. Насечки наносились специально, чтобы вызвать коронный разряд, поскольку в этом случае следует ожидать максимальный эффект воздействия поля на конденсацию. На проволоку подавалось постоянное высокое напряжение, а труба служила заземленным электродом. С нижнего конца трубы подавались пар и воздух, которые, смешиваясь, образовывали рабочую среду, из которой конденсировался пар. Конденсат стекал в мерный стакан, находящийся под трубой. Снаружи труба-конденсатор охлаждалась потоком воздуха от вентилятора.

Результаты исследований обрабатывались в виде графических зависимостей относительной массы конденсата от массовой концентрации воздуха  $G_E/G_0 = f_1(c)$  при различных силах тока  $I$  и от силы тока при различных скоростях  $v$  внешнего обдува  $G_E/G_0 = f_2(I)$ . По этим двум зависимостям устанавливалась и третья –  $G_E/G_0 = f_3(v)$ . Опыты показали, что с ростом концентрации воздуха относительная масса конденсата уменьшается, а увеличение силы тока и скорости обдува трубы приводят к усилению процесса конденсации. Эти результаты, вполне понятные с физической точки зрения, неудобны в целях инженерных расчетов. Поэтому представлялось необходимым их критериальное обобщение, что и предопределило основную цель предпринятой работы.

### Частные зависимости

Известно, что обобщенные зависимости ищут в виде степенных функций от обобщенных параметров, называемых критериями подобия [6]. Показатели этих зависимостей можно находить по частным зависимостям в логарифмических координатах:

$$\lg \frac{G_E}{G_0} = \begin{cases} \lg f_1(c_2); & f_1 \sim c_2^n; & I, v = \text{const}; \\ \lg f_2(I); & f_2 \sim I^m; & v, c_2 = \text{const}; \\ \lg f_3(v); & f_3 \sim v^p; & I, c_2 = \text{const}. \end{cases} \quad (1)$$

Поскольку  $f_1(c)$  является убывающей функцией от концентрации воздуха, то целесообразно перейти к возрастающей функции  $f_2(c_2)$  от концентрации пара  $c_2 = 1 - c$ , что и отражено в первой строке формул (1). С учетом этого по данным работы [5] на рис. 1 построены зависимости (1) в логарифмической сетке, в которой происходит спрямление кривых. По тангенсам углов наклона этих прямых (рис. 1) находим показатели степеней:  $n = 1,14$ ;  $m = 0,15$ ;  $p = 0,42$ .

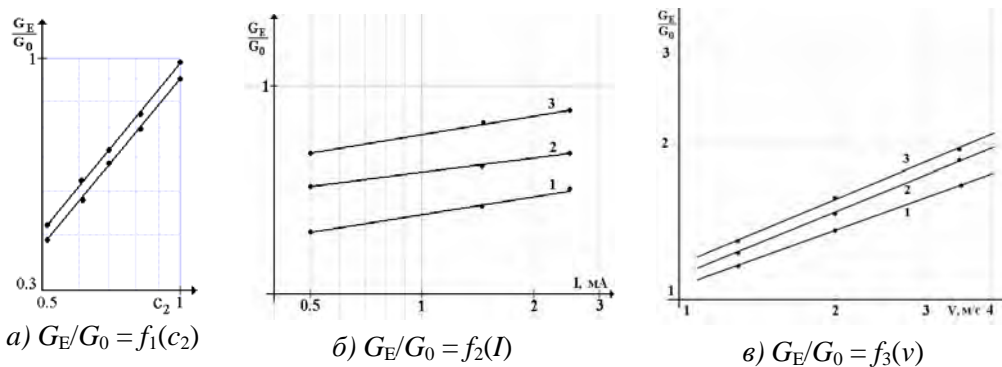


Рис. 1. Зависимости  $f_1(c_2)$ ,  $f_2(I)$  и  $f_3(v)$

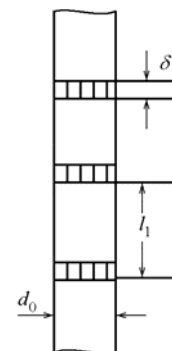


Рис. 2. Схема насечек

### Критерии подобия

Для построения обобщенной зависимости необходимы критерии подобия, соответствующие каждой из независимых переменных системы (1). Концентрация пара  $c_2$ , будучи безразмерной величиной, сама является критерием подобия. Для скорости обдува критерием подобия, естественно, будет число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v d}{\nu_0}, \quad (2)$$

где  $\nu_0$  – кинематическая вязкость воздуха комнатной температуры. Охлаждению воздуха способствует и естественная конвекция вокруг трубы, однако этот эффект мал по сравнению с вынужденным обдувом, и он учитывается массой конденсата в отсутствие поля.

Наиболее сложным является учет влияния электрического поля на конденсацию. Сначала необходимо выяснить физическую сущность механизма взаимодействия поля и среды. В работе [4] данное взаимодействие трактуется с позиций идеальных диэлектриков, в частности путем учета деформации границы раздела пар–жидкость поляризационными силами. Однако, не оспаривая значимость такого эффекта, существеннее является *коронный разряд* [7] с вытекающими отсюда последствиями *униполярной зарядки* среды и явления *электрического ветра*. Оба эти фактора способствуют турбулизации паровоздушной смеси и интенсификации как процесса теплообмена, так и массопереноса. Веским аргументом в пользу вышесказанного предположения служит тот экспериментальный факт, что существенное влияние электрического поля на эти процессы наблюдается одновременно с разрядным током в высоковольтной цепи, причем этот ток однозначно *коронной* природы, поскольку возникает от областей очень малых размеров («царапин»). Следовательно для характеристики воздействия электрического поля на массо- и теплоперенос необходим критерий, учитывающий интенсивность электрического ветра. Такой критерий установлен нами ранее [8] и имеет вид

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

где  $j$  – плотность тока коронного разряда;  $\gamma$  – плотность среды (смеси газов);  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $l$  – характерный размер коронирующей области;  $k$  – коэффициент подвижности ионов знака коронирующего электрода.

Как отмечено в [8], показатель степени  $q$  заключен в пределах  $1 > q > 0,5$ , причем убывает от единицы до 0,5 по мере развития электрического ветра от ламинарного режима до турбулентного. Выражение (3), названное впоследствии «электрическим» числом Рейнольдса [9], 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). Попытаемся использовать это число и для обобщения данных по конденсации в условиях коронного

разряда, поскольку физическая сущность рассматриваемых взаимодействий во многом одинакова. Конкретизируя параметры, входящие в формулу (3), прежде всего, заметим, что плотность тока будет зависеть, помимо электрического напряжения, и от геометрических факторов. На рис. 2 приведена схема насечек в виде заштрихованных колец.

Поскольку именно от них исходит коронный разряд, то ясно, что характерным размером в формуле (3) должна служить ширина насечки  $l \equiv \delta$ , которую в расчетах примем порядка ширины острия лезвия ( $10 \mu k$ ). При этом плотность электрического тока определится цепочкой равенств:

$$j = \frac{I_1}{S_1}; I_1 = \frac{I}{N}; S_1 = \pi d_0 \delta; N = \frac{L}{l_1}; \Rightarrow j = \frac{Il_1}{\pi d_0 L \delta}. \quad (4)$$

Паровоздушная смесь по критерию (3) характеризуется термодинамическим параметром, равным отношению  $\gamma/\eta^2$ , который, как можно показать в рамках кинетической теории идеального газа, является величиной, зависящей от давления  $p$ , температуры  $T$  и размеров молекул. Действительно, полагая смесь идеальным газом, для плотности будем иметь

$$\gamma = \frac{p}{RT} \cdot M, \quad (5)$$

где  $M$  – молярная масса смеси.

С другой стороны, вязкость идеального газа дается формулами:

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot \bar{u} \cdot \lambda = \frac{1}{3} \cdot m_0 n \cdot \sqrt{\frac{3RT}{M}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi d_*^2 \cdot n} = \frac{1}{\pi d_*^2 N_A} \cdot \sqrt{\frac{RTM}{6}},$$

где  $d_*$  – диаметр молекулы;  $m_0$  – ее масса; остальные обозначения общепринятые.

С учетом этих равенств получим

$$\frac{\gamma}{\eta^2} = 6p \cdot \left( \frac{\pi d_*^2 N_A}{RT} \right)^2,$$

параметр который при данных  $p$  и  $T$  зависит лишь от размеров молекул. Для воздуха и водяного пара диаметры молекул приблизительно одинаковы, поэтому дробь в левой части можно считать постоянной и отнести лишь к одной компоненте, удобнее – к воздуху.

Вместе с тем на практике имеем дело с реальными газовыми смесями, для которых вязкость сложным образом зависит как от частных коэффициентов вязкости, так и других физических параметров [10]. Поэтому в расчетах желательно применение более адекватных величин из таблиц экспериментальных данных для смесей. Однако для плотности, как показывают оценки, с достаточной точностью приемлема формула (5), в которой молярная масса определится общепринятым выражением:

$$M = \frac{m_1 + m_2}{(m_1 / M_1) + (m_2 / M_2)}, \quad (6)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – молярные массы; индексы «1» и «2» относятся к воздуху и пару соответственно. Приняв во внимание определения концентраций  $c_1 = m_1/m$ ;  $c_2 = m_2/m$ ;  $m = m_1 + m_2$ , получим

$$\gamma = \frac{p}{RT} \cdot \frac{M_1}{1 + \gamma' \cdot c_2} = \frac{\gamma_1}{1 + \gamma' \cdot c_2}; \gamma' = \frac{M_1}{M_2} - 1. \quad (7)$$

Как и следовало ожидать, плотность смеси падает с ростом плотности пара.

Коэффициенты вязкости  $\eta$  [10] и подвижности  $k$ , как уже было отмечено, сложно зависят от значений этих коэффициентов для отдельных компонентов, поэтому в первом приближении определим их как среднестатистические:

$$\begin{aligned} \eta &= c_1 \eta_1 + c_2 \eta_2 = \eta_1 (1 - \eta' c_2); \quad \eta' = 1 - (\eta_2 / \eta_1); \\ k &= c_1 k_1 + c_2 k_2 = k_1 (1 - k' c_2); \quad k' = 1 - (k_2 / k_1). \end{aligned} \quad (8)$$

Эти формулы применимы лишь в силу близости искомых коэффициентов  $\eta$  и  $k$  для воздуха и пара. Из них следует, что наличие воздуха, у которого как вязкость, так и подвижность больше, чем у пара,

приводит к увеличению обоих этих коэффициентов, что способствует *ухудшению* процесса конденсации.

Подставив последнюю формулу (4) в (3), с учетом (7), (8) получим

$$\text{Re}_E = \left( \frac{I \cdot l_1 \delta^2 \gamma_1}{\pi d_0 L k_1 \eta_1^2} \right)^q \left[ \frac{1}{(1 + \gamma' c_2)(1 - k' c_2)(1 - \eta' c_2)^2} \right]^q. \quad (9)$$

### Обобщенная зависимость

Таким образом, имеются три критерия подобия:  $c_2$ ;  $\text{Re}_E$  и  $\text{Re}$ . Ищем обобщенную зависимость в стандартном степенном виде:

$$G_E/G_0 = a \cdot c_2^n \cdot \text{Re}_E^m \cdot \text{Re}^p. \quad (10)$$

Подставив в данное выражение формулу (9), найдем

$$\frac{G_E}{G_0} = a \cdot c_2^n \cdot \text{Re}_{E1}^m \cdot \left[ \frac{1}{(1 + \gamma' c_2)(1 - k' c_2)(1 - \eta' c_2)^2} \right]^m \cdot \text{Re}^p, \quad (11)$$

где выделен отдельно критерий, относящийся только к воздуху:

$$\text{Re}_{E1} \equiv \left[ \frac{I \cdot l_1 \cdot \delta^2 \gamma_1}{\pi d_0 L \gamma_1 \eta_1^2} \right]^q. \quad (12)$$

Так как выражение в квадратных скобках (11) для данного состава смеси есть функция только от концентрации пара  $c_2$ , то в первоначальном упрощенном варианте обобщения данных опыта эту функцию объединим с множителем  $c_2^n$  и в этом же виде будем искать окончательную зависимость от  $c_2$ . Тогда в (10) вместо зависимости от (9) останется зависимость от (12), причем для простоты за показателем степени  $mq$  сохраним обозначение  $m$ , и тогда искомая критериальная зависимость примет вид

$$\frac{G_E}{G_0} = a c_2^n \cdot \text{Re}_{E1}^m \cdot \text{Re}^p = a c_2^n \cdot \left( \frac{I l_1 \delta^2 \gamma_1}{\pi d_0 L k_1 \eta_1^2} \right)^m \cdot \left( \frac{\nu d}{\nu_0} \right)^p, \quad (13)$$

где постоянная  $a$  подлежит нахождению на основе опытных данных. Так как  $\text{Re}_E \sim I$ ,  $\text{Re} \sim \nu$ , то  $m$  и  $p$  считаем найденными (см. выше). Тогда для уравнения (13) находим

$$G_E/G_0 = a \cdot c_2^{1,14} \cdot \text{Re}_{E1}^{0,15} \cdot \text{Re}^{0,42}. \quad (14)$$

Коэффициент  $a$  можно найти как среднее арифметическое выражения

$$a = (G_E/G_0) \cdot (c_2^{1,14} \cdot \text{Re}_{E1}^{0,15} \cdot \text{Re}^{0,42})^{-1}. \quad (15)$$

Обработка экспериментальных данных приводит к значению  $a \approx 0,018$  и окончательной обобщенной зависимости:

$$G_E/G_0 \approx 0,018 \cdot c_2^{1,14} \cdot \text{Re}_{E1}^{0,15} \cdot \text{Re}^{0,42}. \quad (16)$$

Следует заметить, что малое значение показателя степени «электрического» числа Рейнольдса свидетельствует об интенсивном перемешивании среды внешним электрическим полем, ибо, как отмечалось, показатель степени этого критерия содержит еще один показатель ( $q \rightarrow 0,5$ ), уменьшающийся при развитии электроконвекции.

Данную работу следует рассматривать как одну из первых попыток обработки экспериментальных данных по конденсации с помощью концепций коронного разряда. Предстоят

уточнения роли параметров среды в процессе конденсации при наличии поля. Результаты позволяют сделать общее заключение – о состоятельности данных концепций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С.М. *Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле*. Кишинев: Штиинца, 1987. 320 с.
2. Gidwani A., Molki M., Ohadi M.M. "EHD-enhanced Condensation of Alternative Refrigerants in Smooth and Corrugated tubes," *HVAC&R Research*, 8(3), p. 219–237 (2002).
3. Enhancement of Condensation Heat Transfer on a Finned Tube Using an Electric Field Ren Cai C. Chu, Shigefumi Nishio, Ichiro Tanasawa, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, v. 8, issue 4, 2001, p. 215–229.
4. Болога М.К., Коровкин В. П., Савин И. К. *Двухфазные системы жидкость–пар в электрическом поле*. Кишинев: Штиинца, 1992. 243 с.
5. Bologa M.K., Grosu F.P., Polikarpov A.A. and Motorin O.V. Condensation of a gas-vapor mixture in an electric field. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009, **45**(2), 125–127.
6. Incropera F.P., De Witt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, 6th Edition, 2007.
7. Капцов Н.А. *Электрические явления в газах и вакууме*. М.: Гостехиздат, 1950.
8. Болога М.К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
9. Grosu F.P. and Bologa M.K. Electroisothermal convection and its role in the process of heat exchange. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008, **44**(3), 187–194.
10. Голубев И. Ф. *Вязкость газов и газовых смесей*. М.: Физматгиз, 1959. 375 с.

Поступила 21.12.10

## Summary

The experimental data for condensation of vapor from a gas-vapor mixture in the presence of an electric field are discussed. It is assumed that a corona discharge or, to be more precise, its accompanying phenomena such as unipolar charging of the medium and the electric wind, which produces intense mixing both of the medium and condensate film, is the main factor influencing the intensification of condensation in an electric field. Criteria of similarity of the process, among which the main attention is drawn to the "electric" Reynolds number, which characterizes the interaction of the electric field with the medium, are considered. We also discuss the parameters of vapor-air mixtures, such as density, viscosity and ion mobility. A simplified method of generalization of experimental data on condensation in the presence of an electric field, based on the concepts of corona discharge, is proposed.

---