

## Новый взгляд на теплообмен при конденсации в электрическом поле

И. К. Савин<sup>1</sup>

Петрозаводский государственный университет

В работе представлен новый взгляд на механизм интенсификации теплообмена при конденсации чистого пара в электрическом поле. Он связывает увеличение коэффициента теплоотдачи с изменением равновесного состояния двухфазной системы пар - жидкость при деформации ее границы раздела фаз, вызывая появление дополнительного к нуссельтовскому теплового потока. Показана возможность проявления холодильного эффекта при конденсации в электрическом поле, который уменьшает разность температур пар - стенка. Разработана методика анализа состояния двухфазной системы при помощи капиллярной диаграммы состояния в приближении газа Ван-дер-Ваальса и показан процесс конденсации в электрическом поле в указанной диаграмме. Даны рекомендации расчета некоторых электростатических свойств границы раздела, смещения фазового равновесия, увеличения теплоты фазового перехода, изменения температуры поверхности жидкости при ее деформации электрическим полем.

**Ключевые слова:** конденсация, теплообмен, электрогидродинамика.

### ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование конденсаторов пара связано с проблемами интенсификации теплообмена при конденсации. Один из перспективных методов увеличения коэффициентов теплоотдачи связан с воздействиями электрического поля на процесс конденсации. К настоящему времени в этом направлении накоплен богатый экспериментальный материал. Однако до сих пор нет единого мнения на механизм действия электрического поля на процесс конденсации чистого пара. Все это затрудняет разработку надежной методики расчета коэффициентов теплоотдачи, сдерживая определение оптимальных условий протекания процесса и реализацию данного метода на практике.

Анализ литературных данных и собственных исследований показал, что в рамках модели Нуссельта и изменением гидродинамики невозможно объяснить имеющиеся экспериментальные зависимости [1]. Однако любое увеличение коэффициента теплоотдачи связано с модификацией поверхности пленки конденсата. При этом воздействия на однородную фазу (жидкость или пар) не раскрывают всей полноты физических процессов. Поэтому резонно предположить, что интенсификация теплообмена связана с

изменением состояния границы раздела фаз пар - жидкость, которое изменяет свойства двухфазной системы.

На данное обстоятельство указывают проявление холодильного эффекта [2, 3] и образование температурной неоднородности поверхности жидкости [4, 5] при деформации ее границы раздела фаз пар - жидкость, экспериментально обнаруженных автором.

### МЕХАНИЗМ КОНДЕНСАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Исследования показали [6], что при рассмотрении двухфазной системы в качестве независимого параметра состояния может быть принято капиллярное давление ( $\Pi$ ), учитывающее действие поверхностных сил на границе раздела фаз пар - жидкость и определяемое как разность абсолютных давлений между жидкостью и паром. В настоящее время из-за ограниченности необходимых экспериментальных данных не представляется возможным вычислить значение  $\Pi$  для реальной двухфазной системы, однако его значение можно определить для двухфазной системы газа Ван-дер-Ваальса.

Рассмотрим далее качественную картину процесса конденсации в свете новых представлений. На рис. 1 показан фрагмент поперечного сечения гравитационно стекающей пленки конденсата поперек координаты  $Z$ , соответствующей ширине поверхности теплообмена.

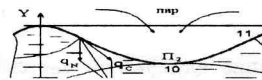


Рис. 1. Качественная модель конденсации в электрическом поле

При включении электрического поля поверхность пленки деформируется, приобретая волнистый характер, и приводит к возникновению градиента капиллярного давления вдоль границы раздела, при этом  $\Pi$  имеет минимальное значение  $\Pi_1$  на горбе и максимальное  $\Pi_2$  во впадине. Градиент капиллярного давления в свою очередь определяет образование градиента температур по поверхности и, как следствие, появление дополнительного капиллярного теплового потока ( $q_c$ ) по отношению к нуссельтовскому ( $q_N$ ) (холодильный эффект).

Процесс деформации при постоянном давлении сопровождается смещением фазового равновесия в сторону больших температур [6], поэтому вершина горба имеет более высокую температуру ( $T_{VE}$ ) по сравнению с начальной ( $T_{VO}$ ), а температуру впадины

<sup>1</sup> Автор - профессор кафедры промышленной теплотехники и энергосбережения

ны - более низкую, стремясь к температуре стенки ( $T_{wl}$ ).

Возникший в результате деформации дополнительный тепловой поток и обуславливает эффект интенсификации теплообмена, при этом происходит искажение температурного поля в пленке конденсата.

С использованием рассчитанных значений капиллярного давления в приближении газа Ван-дер-Ваальса можно построить капиллярную диаграмму состояния двухфазной системы в координатах  $\Pi/P_{cr} - P/P_{cr}$ , где  $P$ ,  $P_{cr}$  - текущее (манометрическое) и критическое давления, фрагмент которой представлен на рис. 2. Линия  $V$  соответствует предельным состояниям двухфазной системы, а кривая  $L$  определяется уравнением Клапейрона - Клаузиуса.

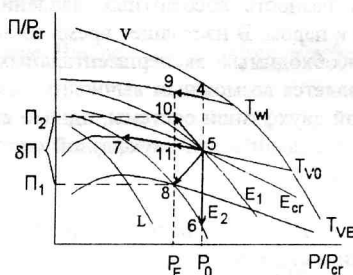


Рис. 2. Интенсификация теплообмена процесса конденсации электрическим полем в капиллярной диаграмме

Конкретное состояние двухфазной системы (расположение на изотермах  $T_{wl}$  и  $T_{vo}$ ) зависит от условий на поверхности стенки (взаимодействие твердое тело - жидкость) и от границы раздела пар - жидкость (ее деформации). Пусть для выбранных изотерм значения капиллярного давления равны: у стенки  $\Pi_{wl}$  (точка 4), а на поверхности пленки  $\Pi_0$  (точка 5). Согласно рис. 1 для интенсификации теплообмена необходимо увеличить  $q_c$ , что, в свою очередь, обеспечивается посредством увеличения разности капиллярного давления  $\delta\Pi = (\Pi_{wl} - \Pi_0)$ , поэтому для роста  $q_c$  при постоянной разности температур ( $T_{vo} - T_{wl} = \text{const}$ ) необходимо изменять условия на стенке и поверхности пленки, чтобы рабочая точка 4 смещалась влево, а точка 5 - вправо. Одновременное смещение обеих точек влево также может вызывать рост  $\delta\Pi$ , однако в меньшей степени. Данный процесс будет сопровождаться возрастанием калометрической теплоты фазового перехода [6], увеличивая плотность теплового потока. В частности, таких эффектов можно достигнуть путем оребрения поверхности теплообмена, ее гидрофобизации, вибрации, воздействием электрического поля и другими.

Рассмотрим более детально изменение состояния двухфазной системы под воздействием электрического поля, для чего на диаграмме нанесены линии постоянной напряженности внешнего электрического поля, характер которых определяется в соответствии с [7] и которые изображаются параболами с ветвями вниз, так как  $d\Pi / dT < 0$ . Кроме того, при  $T_v = \text{const}$   $\Pi$  растет с увеличением  $E$  [7], т. е.  $E_2 > E_1$ .

При включении поля напряженностью  $E_2$  происходит перемещение точки 5 в новое положение, которое определяется условиями процесса. Например, при  $P_v = \text{const}$  точка 5 сместится в положение 6, при этом температура пара  $T_{ve}$  возрастает (рис. 1). Процесс  $T_v = \text{const}$  осуществит переход точки 5 в положение 7,  $P_E$  в этом случае уменьшится. Реально происходит некоторый усредненный процесс  $5 \rightarrow 8$ , при котором возрастает  $T_{ve}$  и уменьшается  $P_E$ . При этом точка 4 займет положение 9. Точка 8 в этом случае соответствует параметрам двухфазной системы на горбе, а точка 10 - во впадине. Первоначальная температура пара будет занимать некоторое промежуточное значение 11. Указанные процессы сопровождаются возрастанием  $\delta\Pi$ . Капиллярный тепловой поток определяется  $\delta\Pi = \Pi_2 - \Pi_1$ , что связано с изменением  $(\Pi_{wl} - \Pi_0)$ .

Следует отметить, что интенсификация теплообмена начинается с определенной величины напряженности поля ( $E_1$  для точки 5). Полученная ранее зависимость критической напряженности от температуры [1, 7] соответствует перемещению точки 5 по некоторой траектории  $E_{cr}$  (рис. 2), когда процесс сопровождается одновременным повышением или понижением температуры и давления, что и реализовывалось на опыте.

Представленный анализ носит качественный характер. По-видимому, характер кривых, их взаимное расположение и числовые значения в дальнейших исследованиях будут уточняться, однако такой подход позволяет целенаправленно осуществлять поиск путей повышения коэффициентов теплоотдачи.

## РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ

Рассмотренные аппроксимирующие уравнения удовлетворительно описывают опытные данные в исследованных диапазонах изменения определяющих параметров и отражают только гидродинамический подход к механизму интенсификации теплообмена, фактически связывая ее с изменением некоторой эффективной толщины пленки конденсата. В то же время следует учитывать изменения состояния границы раздела фаз пар - жидкость под воздействием поля, вклад которого в теплообмен при определенных условиях может превосходить тепло нуссельтовской конденсации [8, 9]. На наличие другого определяющего механизма интенсификации теплообмена указывает разнообразие обобщающих зависимостей. Удовлетворительное описание опытных данных аппроксимирующими уравнениями обусловлено опре-

делением роли волновой структуры, так как деформация границы раздела фаз пар - жидкость вызывает смещение фазового равновесия [6], появление значительных температурных неоднородностей поверхности пленки [3, 6] и дополнительного теплового потока [8, 9]. Разработка методов расчета  $\alpha_E$  с учетом данного механизма является одним из перспективных направлений.

Интенсификацию теплообмена в соответствии с модельными представлениями (рис. 1) будем искать в виде отношения суммарной плотности теплового потока ( $q_\Sigma$ ) к  $q_N$ . Плотность теплового потока в этом случае определяется соотношением

$$q_\Sigma = \delta\Pi \cdot \vartheta_c, \quad (1)$$

где  $\vartheta_c$  - скорость обновления (удаления) конденсата на поверхности теплообмена. Нуссельтовский тепловой поток вычисляется через изменение теплоты фазового перехода

$$q_N = \vartheta_c \cdot \delta\tau \cdot \rho_l. \quad (2)$$

Откуда, выразив  $\vartheta_c$  и подставив в (1), найдем в соответствии с определением увеличение плотности теплового потока за счет капиллярных эффектов

$$q_\Sigma / q_N = 1 + \delta\Pi / \delta\tau \cdot \rho_l. \quad (3)$$

Чтобы воспользоваться формулой (3), необходимо знать изменения капиллярного давления и теплоты фазового перехода.

Разность давлений на границе раздела фаз пар - жидкость определим через максвелловский тензор электростатических натяжений [10]:

$$\Pi = (\epsilon_0 \rho / 2) (\partial\epsilon / \partial\rho) E^2 + \epsilon_0 (\epsilon - 1) [\epsilon (E_n)^2 + E^2] / 2. \quad (4)$$

Опуская подробности анализа уравнения (4) применительно к рассматриваемому случаю, который представлен в [5, 6, 11], отметим лишь, что оно отражает действие внешнего и внутреннего полей. Поэтому в отсутствие внешнего поля изменение капиллярного давления определяется

$$\delta\Pi_0 = \epsilon_0 \epsilon_D (E_0)^2 / 2, \quad (5)$$

а во внешнем поле

$$\delta\Pi = \delta\Pi_0 + \epsilon_0 \epsilon_D (E)^2 / 2, \quad (6)$$

где  $E_0$ ,  $E$  - напряженности внутреннего и внешнего полей;

$\epsilon_D$  - дифференциальная диэлектрическая проницаемость.

Температурные зависимости  $E_0$  и  $\epsilon_D$  можно вычислить на основании экспериментальных данных по температурной зависимости холодильного эффекта

[12], некоторые результаты таких вычислений представлены в [11].

Наибольшее влияние на процесс в условиях конденсации оказывает внешнее электрическое поле. Поэтому в первом приближении при вычислении  $\delta\Pi$  будем учитывать в (6) только внешнее поле. Для расчета интенсификации теплообмена по (3) необходимо знать  $\delta\tau$ , значение которой определим по температурной зависимости теплоты фазового перехода из таблиц

$$\delta\tau = \tau(T_{Eh}) - \tau(T_{wl}). \quad (7)$$

Выражение (7) учитывает проявление холодильного эффекта ( $T_{VE} - T_{Eh}$ ) в зависимости от напряженности поля, а соответственно  $\delta\tau$  также частично учитывает влияния поля.

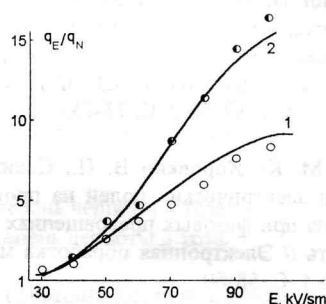


Рис. 3. Зависимость относительной плотности теплового потока от напряженности электрического поля

Результаты расчетов интенсификации теплообмена по предложенной методике ( $q_\Sigma / q_{Nu}$ ) при конденсации хладона 113 представлены на рис. 3 (кривая 1), удовлетворительно совпадая с данными [7] при  $(T_{ES} - T_{wl}) = \text{const}$ . Дополнительный учет влияния поля на теплоту фазового перехода [3, 11] приводит к удовлетворительному совпадению с данными [7] при условии  $q = \text{const}$ . Однозначно объяснить полученный результат в настоящее время сложно. Возможно, это связано с особенностями проявления холодильного эффекта и расчетов свойств состояния двухфазной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлен новый взгляд на механизм интенсификации теплообмена при конденсации чистого пара в электрическом поле, на основании которого осуществлен расчет увеличения плотности теплового потока. Полученные результаты подтверждают правильность предложенной методики и позволяют надеяться на дальнейшие успехи. Однако развитие данного взгляда требует дальнейшего уточнения ряда предположений и экспериментальных исследований.

## 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.
2. Савин И. К. Электродинамический испарительно-конденсационный холодильник // Тр. лесинженерного факультета ПетрГУ. Вып.1. Петрозаводск, 1996. С. 85-89.
3. Bologa M. K., Korovkin V. P., Savin I. K. Mechanism of condensation heat transfer enhancement in an electric field and the role of capillary processes // Int. J. Heat Mass Transfer. 38. 1995. No 1. P. 175-182.
4. Коровкин В. П., Болога М. К., Савин И. К. О неізотермичности поверхности раздела фаз "пар - жидкость" и движущих силх процесса теплообмена // Изв. АН МССР. Сер. Физ.-техн. и матем. наук. 1987. № 2. С. 73-75.
5. Болога М. К., Коровкин В. П., Савин И. К. О влиянии электрических полей на процессы теплообмена при фазовых превращениях типа пар - жидкость // Электронная обработка материалов. 1986. № 4. С. 58-60.
6. Болога М. К., Савин И. К. Электродинамические испарительно-конденсационные системы. Кишинев: Штиинца, 1992.
7. Didkovski A. B., Bologa M. K. Vapor Film Condensation Heat Transfer and Hydrodynamic under the Influence of an electric Field // Int. J. Heat Mass Transfer. 24. 1981. No 5. P. 811-819.
8. Болога М. К., Савин И. К. Теплообмен при конденсации в электрическом поле. Электронная обработка материалов. 1994. № 6. С. 35-38.
9. Болога М. К., Савин И. К. Интенсификация теплообмена при конденсации в электрическом поле // Тр. 1-й Российской национальной конференции по теплообмену. М., 1994. Т. 5. С. 14-19.
10. Болога М. К., Савин И. К. Расчет электростатических свойств двухфазной системы пар - жидкость // Электронная обработка материалов. 1994. № 5. С. 41-44.
11. Савин И. К. Расчет холодильного эффекта при конденсации пара в электрическом поле // Тезисы докл. IV Международной конф. "Современные проблемы электродинамики и электрофизики жидких диэлектриков". СПб., 1996. С. 145-151.