

## О РОЛИ СИЛ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ В ТЕПЛООТДАЧЕ ПРИ ПЛЁНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ

В.Н. Буз, К.А. Гончаров, Г.Ф. Смирнов

*Одесская национальная академия пищевых технологий*

**1. Введение.** Проблема определения масштабов сил, влияющих на закономерности теплоотдачи при пленочной конденсации на поверхности теплообмена разной формы, как следует из обзора [1], по-разному рассматривается разными исследователями. В известной работе [2], по-видимому, впервые сформулирована позиция, получившая впоследствии большую популярность и признание у многих ведущих специалистов: силы поверхностного натяжения решающим образом влияют на интенсивность теплообмена!

Этот взгляд был особенно важен для правильного понимания путей и рациональных технологий интенсификации этого процесса. На практике так сложилось, что существенные положительные эффекты интенсификации были достигнуты при использовании мини- или микро-ребристых поверхностей конденсации. При этом, как показано в [1], многие специалисты [3, 4 и др.] относили это на действие сил поверхностного натяжения. Другие же связывали это со снижением определяющего размера [5 и др.]. Как видно из ссылок [6-12], многие ключевые результаты были многократно апробированы авторами на различных представительных встречах специалистов. Однако к сожалению, авторами было обнаружено, что для некоторых из известных ученых полученные данные являются новинкой сомнительной ценности.

### 2. Исходные положения теоретического анализа

Существуют следующие основные формы организации "отсоса конденсата" с поверхности конденсации:

1. "Отсос конденсата" осуществляется через проницаемую (пористую) поверхность, которая одновременно является поверхностью теплообмена (поверхностью конденсации).

2. "Отсос конденсата" осуществляется через проницаемую стенку, не являющуюся поверхностью теплообмена.

3. Комбинирование условий отсоса конденсата по п.п. 1 и 2.

Каждой из вышеперечисленных форм соответствуют различные геометрии поверхности конденсации.

Организация отсоса через проницаемую поверхность, которая одновременно является поверхностью теплообмена, связана с необходимостью "ввода" между проницаемой поверхностью конденсации и непроницаемой поверхностью, от которой отводится тепло, некоторого зазора, через который будет осуществляться отвод конденсата. Это означает существенное усложнение конструкции и рост полного термического сопротивления переносу тепла от конденсирующегося пара к охлаждаемому потоку. Поэтому, можно предполагать, что предпочтительные варианты организации отсоса конденсата будут связаны с формой №2.

Прямые экспериментальные исследования пленочной конденсации в условиях отсоса не обнаруживаются. Известны аналитические исследования интенсивности теплообмена при конденсации на поверхности проницаемой (пористой) стенки [1...4]. В этих работах теоретически исследовался теплообмен при ламинарной пленочной конденсации на пористой поверхности с постоянной скоростью отсоса.

Принималось: постоянство температуры пористой поверхности; постоянство физических параметров пара и конденсата; состояние пара - сухой, насыщенный; отсасывается только часть образующегося конденсата; движение конденсата, остающегося

на пористой поверхности, осуществляется в форме пленки, толщина которой оказывается зависящей от величины отсоса конденсата.

При конденсации на вертикальной пористой стенке для локального числа Нуссельта  $Nu = \frac{\alpha x}{\lambda}$  получено:

$$Nu = B \frac{\eta_x}{Y} \quad (1)$$

$$\text{где } \eta_x = \left[ \frac{\rho' g r x^3}{\nu' \lambda' \Delta T} \right]^{1/4}, \quad B = - \frac{d \left[ \frac{T - T_w}{T_s - T_w} \right]}{d \frac{y}{\delta}}, \quad Y = \left[ \frac{\rho' g r}{\nu' \lambda' \Delta T_x} \right]^{1/4}.$$

В работах [1...4] выполнены расчеты в области чисел Прандтля жидкости от  $10^{-3}$  до 50;  $0,01 < x < 1/k$  и  $10 < 1/k < 0,1$  для различных значений  $x/H$ , где  $H$  - высота стенки. Расчеты показали, что применение отсасывания приводит к заметному возрастанию теплоотдачи.

При безразмерной интенсивности отсасывания  $j = W_s \left[ \frac{\nu' r^3 \rho'^3 x}{g \lambda'^3 \Delta T^3} \right]$ , равной 1, отношение

количества отсасываемого конденсата к количеству конденсата, стекающего по стенке, обозначаемое  $\psi$ , оказывается равным 4,63. При этом теплоотдача, по сравнению со случаем без отсасывания, возрастает на 50 %. То есть, для того чтобы увеличить коэффициент теплоотдачи в 1,5 раза за счет отсасывания следует отводить через пронцаемую стенку более 80 % конденсата.

Влияние условий отвода конденсата, отсасываемого через пронцаемую стенку, на величину дополнительного термического сопротивления в [1...4] не исследовалось. Поэтому найденную расчетным путем оценку возможного эффекта интенсификации теплообмена при пленочной конденсации за счет отсасывания конденсата через пронцаемую поверхность теплообмена следует рассматривать как верхний предел.

Реальные значения коэффициентов теплоотдачи с учетом дополнительного термического сопротивления, обусловленного условиями отвода конденсата "пронцаемой поверхностью" будут ниже предполагаемых в моделях [1...4].

Подобные результаты были получены и для условий конденсации на пронцаемой поверхности горизонтальной трубы в условиях отсоса конденсата.

Теоретические решения [1...4] для протяженных поверхностей конденсации (большие расстояния от верхней кромки) приводят к линейной зависимости числа  $Nu$  от скорости отсасывания

$$Nu_\infty = W_s \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \frac{r x \rho'}{\lambda' \Delta T} \quad (2)$$

То есть, число  $Nu$  не зависит от числа  $Pr$  и при реальных числах  $K = \frac{r}{C'_p \Delta T} (K \gg 1)$

число  $Nu_\infty$  практически не зависит от  $K$ , то есть

$$Nu_\infty = W_s \frac{r x \rho'}{\lambda' \Delta T} \quad (3)$$

Таким образом, теоретический анализ показал, что организация отсоса конденсата через пронцаемую поверхность теплообмена не сулит существенных эффектов интенсификации и связана с существенными конструктивно-технологическими проблемами, успешное разрешение которых не определено. Экспериментальные исследования в этом направлении не известны.

Вместе с тем, необходимость успешного решения проблемы отвода конденсата в условиях невесомости стимулировала интерес к проблеме пленочной конденсации в условиях отсоса конденсата.

При этом, с точки зрения простоты и надежности технологической реализации отсоса, особый интерес представляют технические решения, в которых отсос конденсата не связан с созданием "проницаемой" поверхности теплообмена.

### 3. Конденсация при отсасывании жидкости за пределами поверхности теплообмена.

Прямое экспериментальное моделирование таких условий не известно. "Косвенно" подобные условия воссоздаются при пленочной конденсации на "профилированных" поверхностях. Например, при конденсации на низко-ребристых поверхностях, когда мениск жидкости, образующийся в межреберном пространстве, является некоторым источником отсоса конденсата с боковой поверхности ребер.

Известно, что в этих условиях интенсивность отсоса (плотность "отсасываемого" потока массы конденсата) или его потенциал (разность давления насыщения и давления в жидкости в сечении отсоса  $P_s - P = P_0$ ) не являются независимыми переменными, существенным и сложным образом распределяются по поверхности теплообмена, а также сильно зависят от многих факторов, в том числе и от интенсивности самого процесса конденсации.

В связи с изложенным, в многочисленных исследованиях процесса пленочной конденсации на профилированных поверхностях не удавалось экспериментально выявить в "чистом" виде зависимость теплоотдачи при пленочной конденсации от интенсивности отсоса.

В аналитических исследованиях [5...8] авторы получили численные решения задач пленочной конденсации для условий, когда единственным средством отвода конденсата является отсос жидкости, создаваемый в некотором сечении независимым образом. Предполагалось, что источник отсоса и его потенциал  $P_0 = P_s - P$  не зависят от процесса конденсации.

Исследования выполнены для различной геометрии поверхностей конденсации с учетом и без учета продольного переноса тепла в стенке, в предположении, что течение жидкости осуществляется только вдоль поверхности конденсации в направлении к сечению отсоса. Динамическим воздействием пара на движение жидкости пренебрегалось. Предполагалось, что пар движется по нормали к направлению движения конденсата.

Авторы исходили из того, что движение конденсата в пленке происходит вследствие понижения давления в месте отсоса за счет внешних сил. Функция сил поверхностного натяжения сводится к тому, что они формируют пленку жидкости таким образом, что при ее движении в любом сечении выполняются законы сохранения массы и количества движения. При этом градиент давления вдоль пленки жидкости является непостоянным и изменяется в соответствии с этими же законами. Определяя толщину пленки жидкости силы поверхностного натяжения решающим образом влияют на интенсивность теплообмена.

Схема рассматриваемого процесса конденсации представлена на рис.1. Принято, что течение пленки одномерное и осуществляется под действием отсоса в сечении А-А,

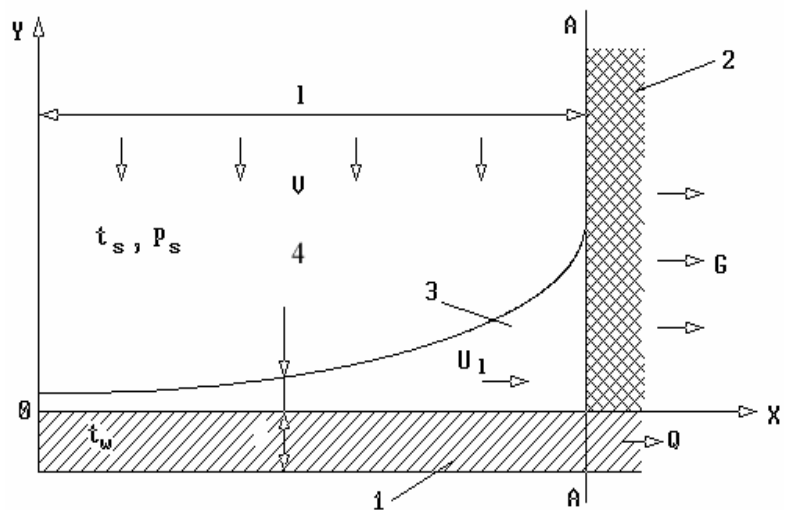


Рис. 1. Схема одномерной модели процесса пленочной конденсации в условиях отсоса за пределами поверхности теплообмена по [5]: 1 – поверхность теплообмена; 2 – сечение отсоса; 3 – пленочное течение конденсата от ОУ до АА; 4 – пар.

переохлаждение конденсата не учитывается. Основные уравнения, описывающие движение пленки жидкости имеют вид:

Одномерное уравнение сохранения количества движения:

$$P' = \text{Re}^2 \left[ 2 \frac{\Gamma'(G')}{\Gamma(G)} + \frac{\Delta'}{\Delta} \right] + \frac{3 \text{Re}}{\Delta^2} \quad (4)$$

здесь  $P' = dP/dx$  - градиент давления в пленке;  $\text{Re} = \frac{\bar{U}L \cdot l}{\nu'}$ ;  $P = \frac{(P_s - P)l^2}{\nu'^2 \rho'}$ ;  $X = \frac{x}{l}$ ;  $\Delta = \frac{\delta L}{l}$ ,

$$\Gamma = \mu' \text{Re}; \quad \Gamma' = \frac{d\Gamma}{dx} = \frac{dG}{dx}; \quad \Delta' = \frac{d(\Delta)}{dx}$$

Уравнение квазистационарной поверхности раздела фаз:

$$\Delta'' = A \sqrt{1 + \Delta'^2} \left[ P - \frac{\rho'}{\rho''} \left( \frac{\Gamma'}{\mu'} \Delta \right) \text{Re} \Delta' \right]^2 \quad (5)$$

Здесь  $A = \frac{\rho' \nu'^2}{\sigma l}$ ;  $\Delta'' = \frac{d^2 \Delta}{dx^2}$

Объединенное уравнение энергии, сплошности течения и теплоотдачи для конденсатной пленки:

$$\frac{\lambda'(t_s - t_w) b}{\delta} = r \frac{dG}{dx} = rG' \quad (6)$$

или в безразмерной форме  $K = \frac{\lambda'(t_s - t_w)}{r \nu' \rho'}$ .

$K$  – безразмерный температурный напор,  $\Delta \frac{\Gamma'}{\mu'} = \text{Re} \Delta \Delta'$

Одномерное уравнение теплопроводности вдоль ребра

$$\lambda_w \frac{d^2 t_w}{dx^2} = - \frac{\lambda'(t_s - t_w)}{\delta' \delta_w}$$

или в безразмерном виде:

$$K'' = \frac{BK}{\Delta} \quad (7)$$

здесь  $K'' = \frac{d^2 K}{dX^2}$  и  $B = \frac{\lambda'}{\lambda_w} \frac{l}{\delta_w}$ .

Средняя интенсивность теплоотдачи характеризуется безразмерным комплексом  $\bar{Nu}$ , равным  $\frac{\bar{\alpha} \cdot l}{\lambda'}$ , где  $\bar{\alpha}$  - средний по поверхности теплообмена (от  $x=0$  до  $x=l$ ) коэффициент теплоотдачи.

$$Nu = \frac{Ql}{bl(t_s - t_w)\lambda'} = \frac{r\rho' \bar{u}_1 \delta_1 b}{\lambda' b(t_s - t_w)} = \frac{\text{Re}_1 \Delta_1}{K},$$

здесь величины с индексом 1 относятся к сечению  $x=A-A$ .

Значение интенсивности теплообмена  $Nu$  может быть найдено в результате решения системы уравнений (4), (5), (6), (7) и в общем случае может зависеть от пяти безразмерных параметров:

- безразмерной разности давлений пара и жидкости в месте отсоса  $P_1$ ;
- безразмерного температурного напора в месте отвода тепла  $K$ ;
- комплекса свойств теплоносителя  $A$ ;
- аналога критерия Био для конденсации на ребре  $B$ ;
- отношения плотностей паровой и жидкостной фаз.

Описание математической модели процесса конденсации при отсосе пленки представлено авторами в публикациях [5...8]. Некоторые отличия в конечной форме уравнений в этих публикациях и в настоящем тексте связаны, главным образом, с разными способами представления решаемой задачи в одномерном виде.

В [8] проведены расчеты для типичных вариантов сочетания граничных условий в системе уравнений (4), (5), (6), (7). Приведем результаты для двух наиболее типичных из множества возможных вариантов моделирования конденсации в условиях отсоса.

Вариант I.

Приняты следующие граничные условия:

$$\text{при } X=0: \quad Re=0; \Delta'=0; P=0; K'=0 \quad (8)$$

$$\text{при } X=1: \quad P=P_1; K=K_1; \quad (9)$$

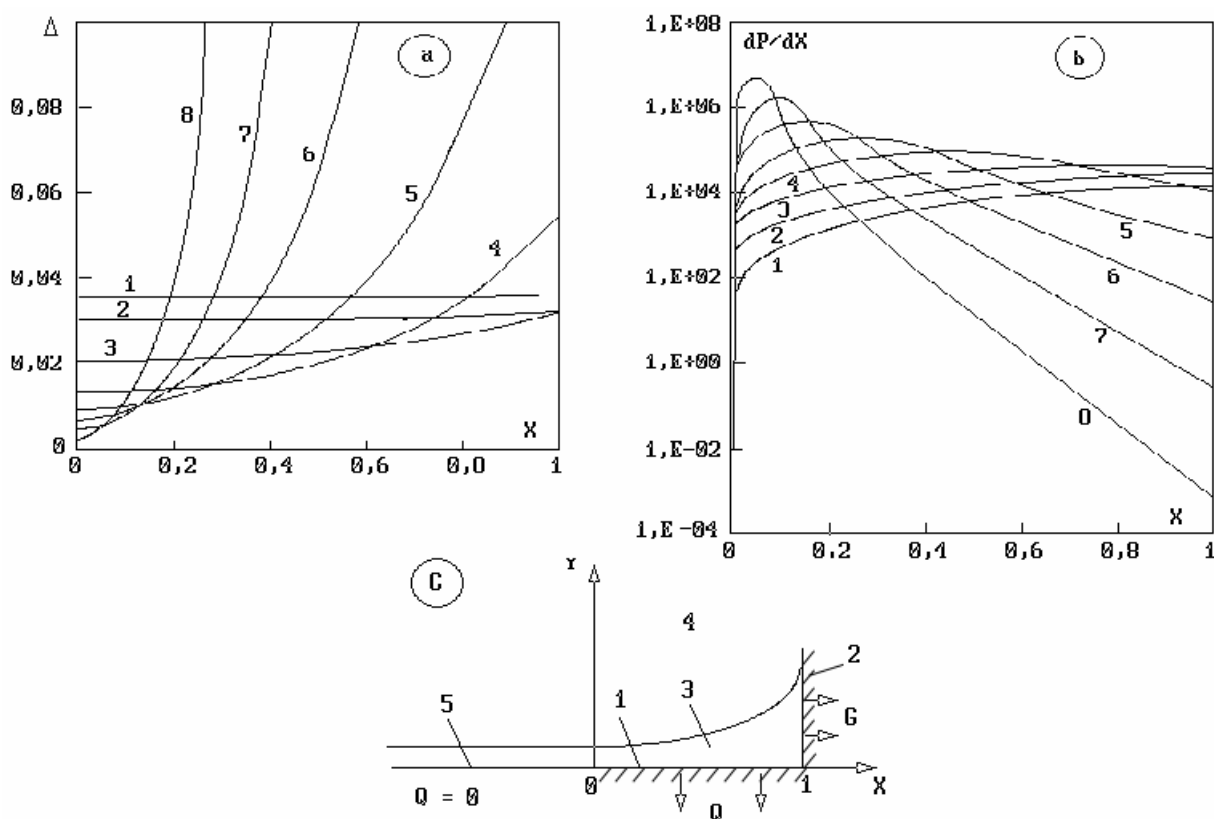


Рис. 2. Закономерности изменения безразмерной толщины пленки  $\Delta$  и градиента давления  $dP/dx$  вдоль поверхности конденсации в условиях отсоса по схеме "С".

Некоторые результаты численного решения системы уравнений (4), (5), (6) для изотермической поверхности конденсации ( $B=0$ ) при крайних условиях (8) и (9) представлены на рис. 2 и свидетельствуют о следующем:

1.1. Пленочная конденсация в условиях отвода конденсата под мощным источником отсоса характеризуется сильным и немонотонным изменением вдоль пленки конденсата градиента давления  $P'$  (рис.2в). Допущение о постоянстве  $P'$  вдоль  $X$ , принимаемое многими авторами, не выполняется во всех случаях.

1.2. Сильные изменения в градиентах давления приводят к сильным изменениям толщины конденсатной пленки.

1.3. При малых интенсивностях отсоса можно считать линейным изменение  $P'$  вдоль  $X$ , что соответствует постоянству  $\Delta$ . В этом случае система уравнений существенно упрощается и принимает вид:

$$P' = \frac{3Re}{\Delta^2} \quad (10)$$

$$Re = \frac{K}{\Delta^2} \quad (11)$$

$$K'' = \frac{BK}{\Delta} \quad (12)$$

и для изотермической задачи ( $K = \text{const}$ ) получено аналитическое решение:  $Nu = 0,904P_1^{0,25}$  (13)

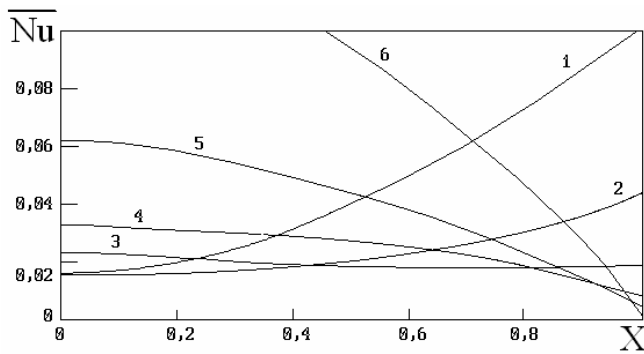


Рис. 3. Закономерности изменения среднего числа  $Nu$  в процессе пленочной конденсации в условиях отсоса, организованного по схеме рис. 2с – кривая 1 и по схеме рис. 4с – кривая 3 в зависимости от параметра отсоса  $P_1$  по данным [6...8].

1.4. При малых интенсивностях отсоса можно считать  $\Delta' \ll 1$ .

1.5. Зависимость числа  $Nu$  от интенсивности отсоса  $P_1$  (рис. 3, кривая 5) свидетельствует о существовании

некоторого максимума интенсивности теплоотдачи, после достижения которого дальнейший рост интенсивности отсоса не способствует росту интенсивности теплообмена.

#### Вариант II.

Рассмотрена задача пленочной конденсации с отсосом жидкости, соответствующая схеме на рис. 4с. Граничные условия при этом записаны следующим образом:

при  $X=0$ :  $Re=0$ ;  $\Delta'=0$ ;  $K'=0$

при  $X=1$ :  $\Delta=\Delta_1$ ;  $P=P_1$ ;  $K=K_1$

В такой постановке появилась дополнительная независимая переменная величина – толщина зоны отсоса  $\Delta_1$ .

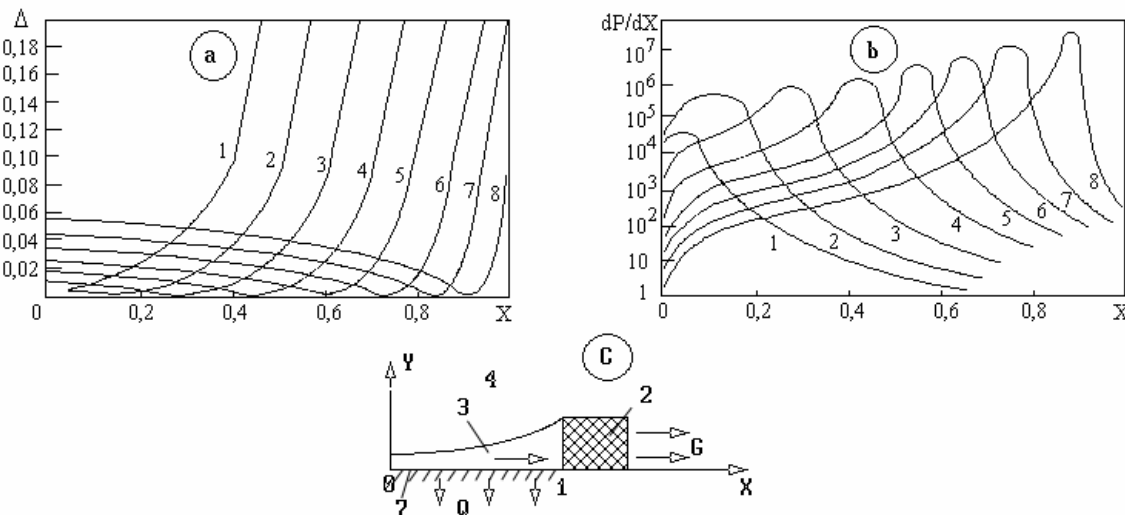


Рис. 4. Результаты математического моделирования процесса пленочной конденсации в условиях отсоса по схеме рис. 4с при разной интенсивности отсоса  $P_1$  (1-8)

Результаты расчетов для этого случая представлены на рис. 4. При качественном отличии изменения толщины пленки и градиента давления вдоль поверхности конденсации по сравнению с рис. 2 полученные результаты, тем не менее, подтверждают основные выводы, приведенные выше. Дополнительно следует отметить следующее:

2.1. При фиксированном  $\Delta_1$ , как следует из рис. 4а, в области небольших  $P_1$  (линии 1-4) рост значения  $P_1$  приводит к уменьшению средней толщины пленки, а значит, к увеличению средней теплоотдачи. При больших  $P_1$  (линии 5-9) рост  $P_1$  сопровождается утоньшением

пленки вблизи зоны отсоса и значительным ростом сил трения в области тонкой пленки. На преодоление этих сил на небольшой длине тратится практически вся располагаемая разность давлений. Такое утонение пленки в одном месте сопровождается ее утолщением на значительной части поверхности конденсации, что приводит к уменьшению средней теплоотдачи. Все это приводит к существованию максимума в зависимости  $Nu=f(P_1)$  рис. 3 (кривая 2).

2.2. Влияние  $\Delta_1$  на распределение и значение  $Nu$  аналогично описанному в пункте 2.1. Зависимость  $Nu=f(\Delta_1)$  также имеет максимум (рис. 5).

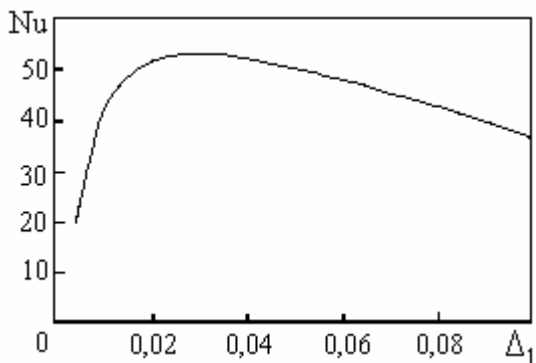


Рис. 5. Результаты математического моделирования зависимости числа  $Nu$  от  $\Delta_1$  для пленочной конденсации в условиях отсоса по схеме рис. 4с.

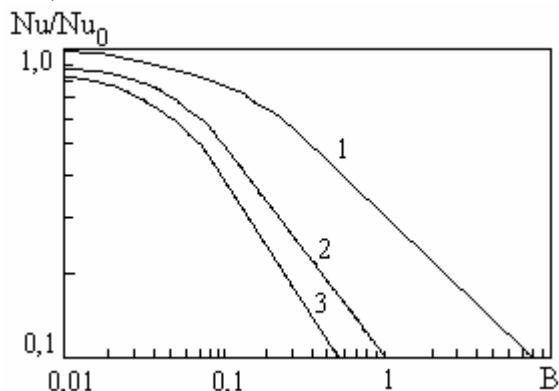


Рис. 6. Результаты математического моделирования пленочной конденсации в условиях отсоса по схеме рис. 4с в форме зависимости числа  $Nu$  от параметра неизотермичности  $B$ .

2.3. В соответствии с пунктами 2.1 и 2.2 возможности интенсификации теплообмена при конденсации с отсосом пленки жидкости ограничены. Существует некоторое общее максимальное значение  $Nu_{max}$  в зависимости и от  $P_1$  и от  $\Delta_1$  зависящее от свойств теплоносителя и безразмерного температурного напора  $K$ .

2.4. Неизотермическая задача конденсации соответствует условию  $B \neq 0$ . Влияние параметра неизотермичности  $B$  на снижение  $Nu$  в сравнении с изотермической задачей ( $Nu_0$ ) дано на рис. 6. Из графиков видно, что при  $B > 0,1$  наблюдается заметное, а при  $B > 1$  значительное снижение  $Nu$  в сравнении с изотермической задачей.

Таким изменениям соответствует относительно слабое изменение распределения толщины пленки жидкости и значительное изменение распределения безразмерного температурного напора  $K$  вдоль поверхности. Это свидетельствует о том, что снижение  $Nu$  в неизотермическом случае определяется, главным образом, не перераспределением толщины пленки конденсата, а ростом термического сопротивления стенки.

Изложенные математические модели одномерных течений конденсата в процессах пленочной конденсации могут служить основой решения некоторых практических задач, в которых формы пленочных течений отличаются существенным разнообразием, двумерным характером и сильной немонотонностью. Некоторые из таких задач играют важную роль при теоретическом описании процессов конденсации в соответствующих устройствах. Авторы [5...8] рассмотрели две типичные для условий конденсации на профилированных поверхностях задачи – конденсацию на поверхности с треугольными и прямоугольными ребрами.

#### 4. Моделирование пленочной конденсации пара на поверхности с треугольными ребрами

В основе предложенной в [9] модели конденсации на ребристой поверхности (рис.7) использованы физические представления об особенностях теплообмена при пленочной конденсации и механизме течения жидкостной пленки, изложенные в [8]. Система уравнений имеет вид:

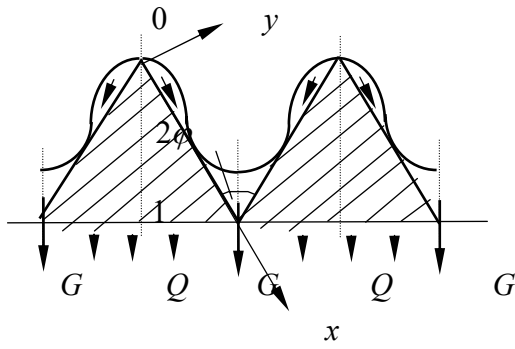


Рис. 7. Схема пленочной конденсации на поверхности с треугольным оребрением и отводом конденсата в основании ребер

Для записи условий на другой границе используем условие симметрии пленки относительно биссектрисы угла  $2\varphi$  в основании канавки:

$$\begin{aligned} \text{при } X = 1 - \Delta \cdot \Delta' : \quad \Delta' &= \operatorname{tg}(\pi/2 - \varphi), \quad P = P_1 \\ \text{при } X = 1 : \quad K &= K_1 \end{aligned}$$

Примеры результатов численного решения [9] системы уравнений (14)-(17) представлены на рис. 8 и 9.

Как следует из графиков, для случаев затопленной оребренной поверхности, что соответствует малым значениям  $P$ , значительные относительные увеличения  $P$  лишь несколько деформируют поверхность жидкости, уменьшая радиус кривизны. Средняя интенсивность теплообмена при этом, как видно из рис.9, практически не изменяется. При

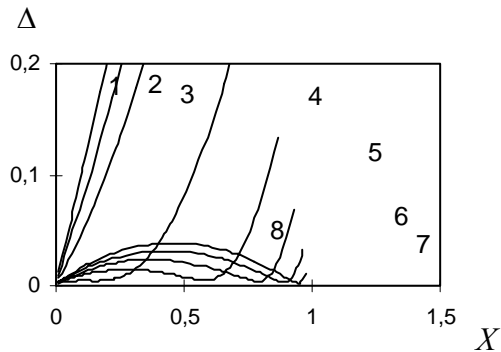


Рис. 8. Расчетные распределения  $\Delta$  вдоль поверхности ребра при  $A=2 \cdot 10^{-5}$ ;  $B = 0,05$ ;  $R = 2000$ ;  $K_0 = 0,05$ ;  $\varphi = \pi/4$  и различных  $P$ : 1 - 20; 2 -  $2 \cdot 10^4$ ; 3 -  $4 \cdot 10^4$ ; 4 -  $8 \cdot 10^4$ ; 5 -  $1,6 \cdot 10^5$ ; 6 -  $3,2 \cdot 10^5$ ; 7 -  $6,4 \cdot 10^5$ ; 8 -  $1,3 \cdot 10^6$ .

достижении  $P \sim 5 \cdot 10^4$  качественно меняется характер распределения  $\Delta$  вдоль поверхности конденсации - возникает немонотонность изменения толщины пленки вдоль поверхности, характерная для больших  $P$ . При этом, несмотря на некоторое увеличение толщины пленки жидкости вблизи вершины ребра, резко возрастает интенсивность теплообмена из-за увеличения поверхности конденсации в связи с заглублением основного мениска. При дальнейшем увеличении  $P$  в области  $P > 5 \cdot 10^5$  величина  $Nu$  изменяется незначительно и может как увеличиваться, так и уменьшаться, что связано с противоречивым влиянием нескольких факторов: с одной стороны, средняя толщина пленки возрастает, с другой стороны, увеличивается площадь поверхности конденсации а также уменьшается термическое сопротивление теплопроводности в ребре.

### 5. Конденсация движущегося пара с учетом его динамического воздействия на пленку жидкости

Для решения задачи конденсации движущегося пара необходимо модель, описанную в разделах 1 и 2, дополнить уравнениями движения и сплошности парового потока, а также

$$P' = \operatorname{Re}^2 \left( 2 \frac{\operatorname{Re}'}{\operatorname{Re}} + \frac{\Delta'}{\Delta} \right) + \frac{3 \operatorname{Re}}{\Delta^2}, \quad (14)$$

$$\Delta'' = A \sqrt{1 + \Delta'^2} \left[ P - R(\operatorname{Re}' \Delta + \operatorname{Re} \Delta')^2 \right], \quad (15)$$

$$\operatorname{Re}' = \frac{K}{\Delta^2} \sqrt{1 + \Delta'^2} - \frac{\operatorname{Re} \Delta'}{\Delta}, \quad (16)$$

$$K'' + \frac{K'}{X} - \frac{K}{X \cdot \Delta \cdot B \cdot \operatorname{tg} \varphi} = 0, \quad (17)$$

Для вершины ребра граничные условия запишем так:

$$\text{при } X = 0: \quad \operatorname{Re} = 0, \quad \Delta = \varepsilon, \quad K' = 0,$$

где  $\varepsilon$  - некоторая заведомо малая относительная толщина пленки жидкости.

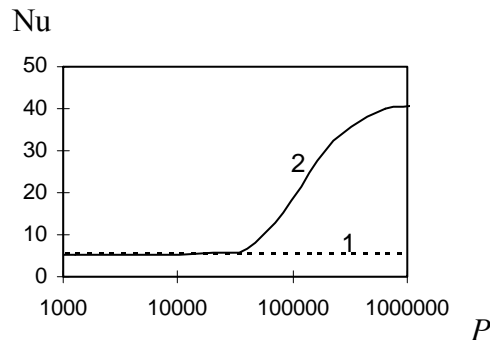


Рис. 9. Зависимость интенсивности теплоотдачи  $Nu$  от интенсивности отвода конденсата  $P$ . 1 - расчет по формуле (3); 2 - решение системы уравнений (14) - (17)



условиями взаимодействия на границе раздела фаз. Подобная модель стационарной пленочной конденсации движущегося пара в щели в условиях действия сил давления, тяжести и поверхностного натяжения рассмотрена в [10,11]. Результаты расчетов представлены на рис.10. На этом графике все геометрические параметры отнесены к длине участка конденсации  $l$ . В расчетах изменялась только высота канала  $h$ . При уменьшении  $h$  увеличивается скорость пара и его динамическое воздействие на пленку, что приводит к уменьшению ее толщины. Это проявляется в прилегающей ко входу зоне, где скорость пара велика. В конце участка конденсации скорость пара мала, конденсация происходит как в неподвижном паре при существенном влиянии сил поверхностного натяжения. Между этими двумя зонами находится область, из которой транспортировка конденсата затруднена как динамическим воздействием пара из-за малой его скорости, так и с помощью сил поверхностного натяжения. В этой области может происходить накопление жидкости и периодическое образование жидкостных пробок

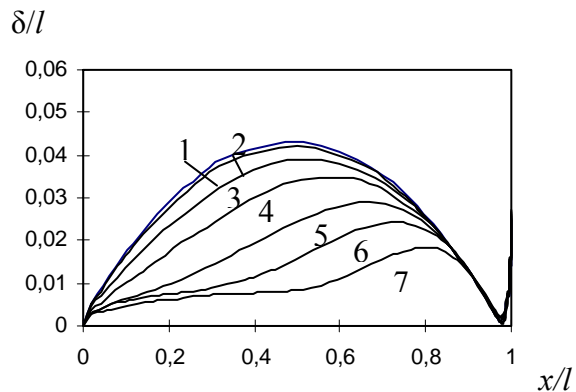


Рис.10. Влияние динамического воздействия пара на распределение пленки жидкости вдоль поверхности конденсации при различных значениях относительной высоты канала  $h/l$ : 1 - 0,1; 2 - 0,08; 3 - 0,06; 4 - 0,05; 5 - 0,04; 6 - 0,03; 7 - 0,025

#### 6. Оптимизация профиля ребер при пленочной конденсации на оребренной стенке.

В [6-8, 12] рассмотрена физическая и математическая модель пленочной конденсации на поверхностях с отсосом пленки конденсата. В [12] также перечислены основные причины создания некорректных моделей пленочной конденсации, заключающиеся в следующем.

1. Распределение параметров пленки (ее толщины, градиента давления) заранее не известны и могут быть определены в результате решения обратной задачи теплообмена. Нередко проявляется стремление исследователей решать более простую прямую задачу тепломассопереноса, при этом обычно из каких-то дополнительных модельных соображений задают форму поверхности раздела фаз и (или) продольный градиент давления в пленке жидкости.

2. Распространены физически необоснованные представления о силе поверхностного натяжения, как о силе, «стягивающей» жидкость с поверхности конденсации [7]. Активную роль в отводе жидкости силы поверхностного натяжения играть не могут, поскольку их равнодействующая обычно направлена перпендикулярно поверхности пленки. Эти силы лишь формируют толщину и кривизну пленки так, что в любом сечении выполняется баланс сил трения и давления.

3. Большинство авторов систему уравнений для пленки конденсата сводят к одному дифференциальному уравнению четвертого порядка относительно толщины пленки [13-15]. Это затрудняет интерпретацию физического смысла отдельных слагаемых и всего уравнения, что, в свою очередь, затрудняет корректную формулировку граничных условий и анализ результатов. Не каждому очевидно, как, например, физически трактовать третью и четвертую производную толщины пленки.

4. Как следует из записанных уравнений в модели [6-8], даже в простейшем случае модель предусматривает задание, как минимум, четырех граничных условий, что можно сделать множеством сочетаний. Какое из сочетаний является физически наиболее корректным во многих случаях оценить непросто. Это усугубляется причинами, изложенными выше в пунктах 1-3 а также тем, что граничные условия обычно не заданы независимо, а определяются в ходе решения сопряженных задач.

По изложенным причинам некорректные подходы продолжают развиваться и в настоящее время. Так в работе [16] традиционно независимо задается радиус кривизны пленки на вершине ребра. Фиксированной задана кривизна пленки в основании ребра. При

такой постановке формально решается математическая задача. Авторы не пытаются проанализировать, какова связь между независимо задаваемым в модели радиусом кривизны пленки на вершине ребра и реально заданными на практике параметрами отсоса жидкости (при постоянной кривизне у основания ребра). И вообще, возможна ли физическая реализация тех численных значений радиуса пленки, которые задаются в расчетах?

Влияние профиля ребра рассмотрено в [12,17] на примере моделирования конденсации на внутренней поверхности тепловых труб с продольными ребрами. Радиус кривизны  $R$  поверхности полки может быть различен. Как показали результаты расчетов (рис.11), увеличение радиуса кривизны приводит, с одной стороны, к уменьшению площади поверхности конденсации, с другой стороны, к уменьшению средней толщины пленки. Из расчетов следует, что обычно второй фактор преобладает. При одинаковых условиях на цилиндрической поверхности коэффициент теплоотдачи больше, чем на плоской от полутора до четырех раз.

В работах [12,17] проводилась не оптимизация профиля ребер, а лишь сравнение интенсивности теплообмена при разной кривизне поверхности конденсации. В то же время, разработанные модели и методы позволяют сравнительно несложно провести оптимизацию профиля ребра.

## 7. Выводы

При пленочной конденсации в условиях определяющего влияния интенсивности отсоса возникают различные картины пленочных течений в зависимости от геометрии поверхностей конденсации, в том числе и каналов, теплофизических свойств жидкостей и параметров "теплового взаимодействия" образующегося конденсата и продольного переноса тепла в стенке.

Во всех случаях наблюдается:

1. Существенный рост интенсивности теплообмена при увеличении интенсивности отсоса в области малых значений относительной интенсивности отсоса  $1 < \psi < 5$ .
2. В пределах изменения возможной интенсивности отсоса для различных геометрий наблюдается существенно немонотонный характер зависимости интенсивности теплообмена от основных факторов. В этих же пределах существует экстремум (максимум) интенсивности теплоотдачи при пленочной конденсации на поверхностях различной геометрии.
3. В целом применение микроструктуры как способа организации отсоса может быть весьма эффективным и дать существенный положительный результат при определенных условиях для каждой геометрии.

## Обозначения

$h$  - высота ребра, м;  $p$  - давление, Па;  $t$  - температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R$  - радиус кривизны кромки, м;  $r$  - удельная теплота парообразования, Дж/(кг · К);  $\bar{u}$  - средняя скорость жидкости по сечению пленки, м/с;  $x$  - продольная координата, м;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\delta$  - толщина пленки конденсата, м;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - вязкость жидкости, Па · с;  $\sigma$  - поверхностное натяжение, Н/м.

Индексы:  $l$  - жидкость;  $v$  - пар;  $w$  - стенка;  $s$  - насыщение; 0 - вершина ребра; 1 - основание ребра; ' - первая производная по  $X$ ; '' - вторая производная по  $X$ .

Безразмерные комплексы:  $X \equiv \frac{x}{l}$ ;  $\Delta \equiv \frac{\delta}{l}$ ;  $\text{Re} \equiv \frac{\rho_l \bar{u}_l l}{\mu_l}$ ;  $\text{Nu} \equiv \frac{\alpha l}{\lambda_l}$ ;  $P \equiv \frac{(p_s - p_l) l^2 \rho_l}{\mu_l^2}$ ;

$$K \equiv \frac{\lambda_l (t_s - t_w)}{\mu_l r}; \quad A \equiv \frac{\mu_l^2}{\rho_l \sigma l}; \quad B \equiv \frac{\lambda_l}{\lambda_w}; \quad R \equiv \frac{\rho_l}{\rho_v}.$$

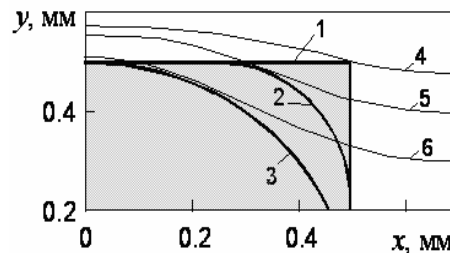


Рис.11. Распределение жидкости (линии 4 - 6) в поперечном сечении тепловой трубы с продольными ребрами при разных значениях кривизны кромки ребер (линии 1 - 3): 1 и 4 -  $R = 0$ ; 2 и 5 -  $R = 2.5$  мм; 3 и 6 -  $R = 5$  мм

## Литература

1. Джейн, Бэнкофф. Ламинарная пленочная конденсация на вертикальной стенке с постоянной скоростью отсасывания/ Теплопередача (Trans.ASME.Ser.C), 1964, N 6, с.10-14.
2. Линхард, Дир. Приближенный расчет пленочной конденсации при ламинарном течении конденсата с учетом отсоса/ Теплопередача (Trans. ASME. Ser.C), 1972, т.94, N 3, с.82-84.
3. Фрэнкел, Бэнкофф. Ламинарная пленочная конденсация на стенке пористой горизонтальной трубы с постоянной скоростью отсасывания/ Теплопередача. (Trans.ASME. Ser.C), 1965, т.87, N 1, с.115-123.
4. Ян Жи-у. Влияние постоянной скорости отсоса на пленочную конденсацию при ламинарном течении конденсата на пористой вертикальной стенке/ Теплопередача. (Trans.ASME. Ser.C), 1970, т.92, N 2, с.43-48.
5. Smirnov H.F. and Buz V.N. The Condensation on the Finned Corrugated Surfaces when the Condensate Film Flows Without Gravitational Forces Action/ Proc. of the IX Int.Heat Pipe Conf. Albuquerque, May, 1995.
6. Смирнов Г.Ф., Буз В.Н. Конденсация на профилированных поверхностях при негравитационном течении пленки Тепломассообмен ММФ 96. Минск, 1996. Т.4, Тепломассообмен в двухфазных системах. ч. 2, с. 131-135
7. Smirnov H.F., Buz V.N. and Goncharov K.A. Intensification of Heat Exchange in Two Phase Loop Condensers for Space Applications/ The 10 -th Int.Heat Pipe Conf. Preprints of Sessions A1, A2. Paper A1-1, September, 1997, Stuttgart. Germany.
8. Buz V.N., Smirnov H.F. The film-wise condensation on the finned surfaces and with artificial suction in space conditions / Proc.of the Intern.Symp."The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation". May, 1997, Moscow, Russia, pp.545-549.
9. Артеменко С.В., Буз В.Н. Расчетный анализ пленочной конденсации неподвижного пара на оребренной поверхности // Труды второй Российской национальной конференции по теплообмену. Издательство МЭИ, М., 1998. Том 8. С. 54 – 55
10. Банный О.В., Буз В.Н. Численное моделирование пленочной конденсации в плоской щели // РНКТ-2. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т.8. С. 56 – 57
11. Буз В.Н., Гончаров К.А. Гидродинамика и теплообмен при полной конденсации пара в каналах малых размеров // XIII Школа-семинар под рук. акад. РАН А.И.Леонтьева, С-Петербург, 2001.Т.1. С. 381-384.
12. Буз В.Н., Смирнов Г.Ф. Теплообмен при пленочной конденсации в условиях существенного влияния сил поверхностного натяжения // Труды третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Москва, 21 - 25 октября 2002. Издательство МЭИ, М., 2002. Том 4. С. 235 – 238
13. Мори, Хидзиката, Хирасава, Накаяма. Оптимизация характеристик конденсаторов с внешними конденсационными поверхностями // Теплопередача, 1981. Т. 103, № 1. С.116 – 123.
14. Honda H., Fujii T. Semi empirical equation for condensation heat transfer on vertical fluted tubes // ASME HTD-38. 1984. P 99 – 106.
15. Rose J.W. Enhanced condensation heat transfer // XIII Школа-семинар под рук. акад. РАН А.И.Леонтьева, С-Петербург, 2001.Т.1. С. 347-357.
16. Марчук И.В., Кабов О.А. Оптимальные ребра для пленочной конденсации пара // Труды третьей Российской национальной конференции по теплообмену. М., 2002. Том 4. С. 300 – 303
17. Barantsevich V., Golovin O., Goncharov K., Orlov A., Buz V. Investigation performance of axial grooved heat pipes with high thermal capacity. // Heat Pipe Technology Application. Proceedings of the 12th Int. Heat Pipe Conference. Moscow, Russia. May 19 – 24, 2002, p. 489-494.
18. Смирнов Г.Ф., Цой А.Д. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах. – М.: Издательство МЭИ, 1999.