

УДК 536.242.08

УХУДШЕННЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ОКОЛОКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

БАЙРАМОВ Н.М., АШУРОВА У.И. *, РЗАЕВ М.А. **, КЕЛБАЛИЕВ Р.Ф. *

Министерство топлива и энергетики

* *Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия*

** *ВНЦ Министерство обороны Азербайджанской республики*

В данной работе представлены результаты анализа теплоотдачи ароматических углеводородов при околокритических давлениях, а также их сопоставление с данными, полученными с водой.

Говоря о теплообмене при околокритических давлениях (ОКД), мы имеем в виду процессы теплообмена, протекающие при однофазных и двухфазных околокритических областях. Исследования теплообмена при однофазных ОКД показывают, что при определенных сочетаниях режимных параметров, т.е. в условиях существенного изменения физических свойств, возможные режимы течения и теплообмена можно разделить: нормальные режимы, режимы с ухудшенной теплоотдачей, режимы с улучшенной теплоотдачей. В то же время, при двухфазных ОКД и в определенных условиях процессы теплообмена, также можно разделить на нормальные режимы, режим пузырькового кипения и режим кризиса кипения (ухудшенный режим).

Анализ экспериментальных работ, проведенных с водой и ароматическими углеводородами при однофазных и двухфазных ОКД, показывают, что характер распределения температуры стенки по длине трубы, также зависимость температуры стенки от плотности теплового потока имеют идентичный характер [1,2].

Особый интерес в инженерной практике при проектировании и эксплуатации теплообменных аппаратов, работающих при однофазных и двухфазных околокритических давлениях теплоносителя, вызывает возникновение режимов с местным уменьшением теплоотдачи. В этом случае температура стенки теплообменных аппаратов имеет резко выраженный максимум, который может представить известную опасность для теплообменной трубы. Режим, при котором по длине трубы возникает местное уменьшение теплоотдачи, приводящее к повышению температуры стенки, называют режимом «ухудшенного теплообмена».

В соответствии с современными представлениями, кризисы кипения при околокритических давлениях имеют своеобразные особенности и значительно отличаются от кризиса кипения при низких давлениях теплоносителей. В ряде работ кризисы теплообмена классифицируются по своему внешнему проявлению, различают быстрый кризис (fast burnout), характеризующийся резким скачком температуры стенки и медленный кризис (slow burnout) с медленным и не столь значительным увеличением температуры стенки [3].

При околокритических давлениях нарушение теплообмена, носящее характер медленного кризиса, в основном наблюдается в области недогретой жидкости, которое никак нельзя объяснить срывом или увариванием жидкой пленки. В литературе имеются различные модели о механизме кризиса кипения. При недогретых жидкостях и небольших паросодержаниях кризис кипения наступает в результате нарушения гидродинамики потока.

Сложность механизма кризиса кипения и его многофакторность не дает возможности однозначному определению этого процесса и в литературе отсутствует расчетное уравнение для определения температуры стенки при ухудшенном режиме.

Аналогичная обстановка сложилась при однофазных околокритических давлениях. Последнее соображение подтверждается тем, что при ухудшенном режиме в однофазном околокритическом давлении, также отсутствует единое мнение о механизме явления ухудшения теплоотдачи. Кроме того, имеющие некоторые расчетные уравнения, предложенные для однофазного ухудшенного режима, труднодоступны для инженерных расчетов. Так как во всех предложенных уравнениях физические параметры определяются в зависимости от температуры стенки. А при ухудшенных режимах заранее температура стенки неизвестна, поэтому возникают определенные трудности для проектировщиков [4]. Также отсутствуют сопоставляющие работы при ухудшенных режимах в области однофазных и двухфазных околокритических давлений.

В данной работе представлены результаты анализа эксперимента, проведенного с органическими теплоносителями при околокритических давлениях, а также сопоставления полученных результатов с другими жидкостями.

В работе Ф.И. Калбалиева ухудшенные режимы теплоотдачи рассматриваются как чисто гидродинамическая задача, определяемая тепловыми и гидродинамическими режимами процесса. Для описания профиля скорости и температуры жидкости при турбулентном режиме течения было предложено соответствующее уравнение [5].

$$\begin{aligned}
 U_{cp}^+ T_{cp}^+ &= \frac{U}{\frac{q}{\rho_c \bar{C}_p (t_c - t_{жс})}} = \frac{U}{W_{np}} = \frac{1}{\frac{W_{np}}{U}} = \frac{1}{\frac{q}{\rho_c \bar{C}_p (t_c - t_{жс})U}} = \\
 &= \frac{1}{\frac{q}{\rho_{жс} \bar{C}_p (t_c - t_{жс})U} \cdot \frac{\rho_{жс}}{\rho_c}} = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_{жс}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Как видно из формулы (1), профиль скорости и температуры является функцией соотношения вынужденной скорости течения (U) к приведенным скоростям (W_{np}). Исходя из этого соображения был сделан вывод о том, что ухудшение теплоотдачи, также является функцией соотношения U и W_{np} . Для определения границы начала ухудшенного режима в работе Ф.И. Калбалиева использован безразмерный комплекс K_1 и зависимость его от приведенной температуры (T_{np}). При докритических давлениях и в условиях вынужденного движения жидкости по трубе интенсивность теплоотдачи, также зависит от соотношения двух скоростей (Соотношением скорости парообразования W_* и скорости вынужденного течения U) [6].

$$K_w = \frac{W_*}{U} \tag{2}$$

где:
$$W_* = \frac{q_0}{r\rho''} \tag{3}$$

Сравнение безразмерных комплексов K_1 и K_w показывает, что оба комплекса имеют идентичный физический смысл.

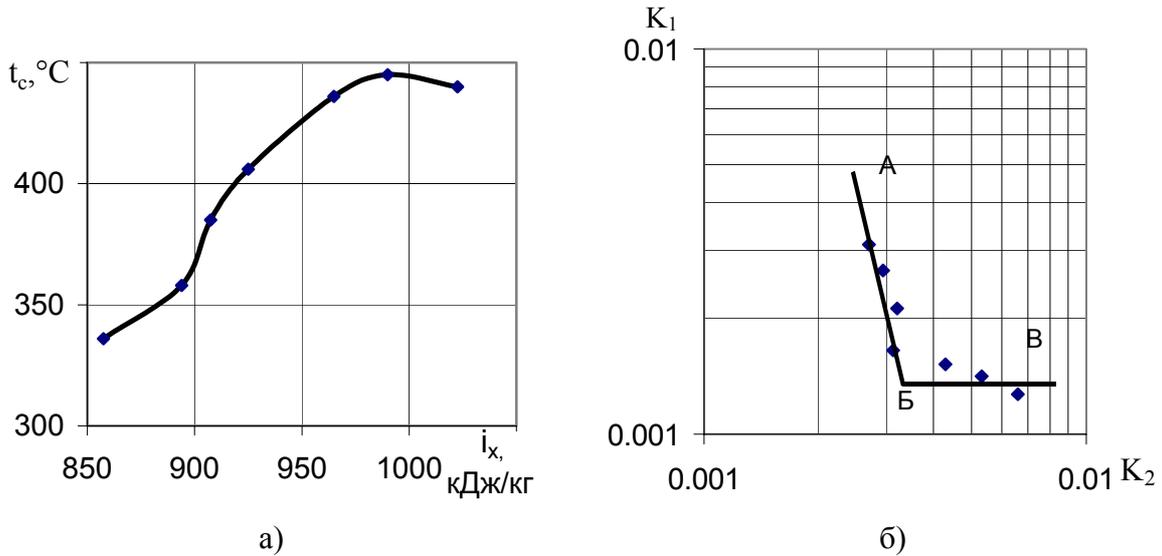
Анализы экспериментальных данных, проведенных нами с ароматическими углеводородами, показывают, что при определенных сочетаниях режимных параметров ухудшение теплоотдачи наблюдается в начале области псевдокритических температур. Поэтому для определения границы начала ухудшенного режима в работе [2] было

предложено использование зависимости $K_1 = f(K_2)$. Безразмерный комплекс K_2 определяется по следующей формуле:

$$K_2 = \frac{q}{\rho_{жс} U \Delta i} \quad (4)$$

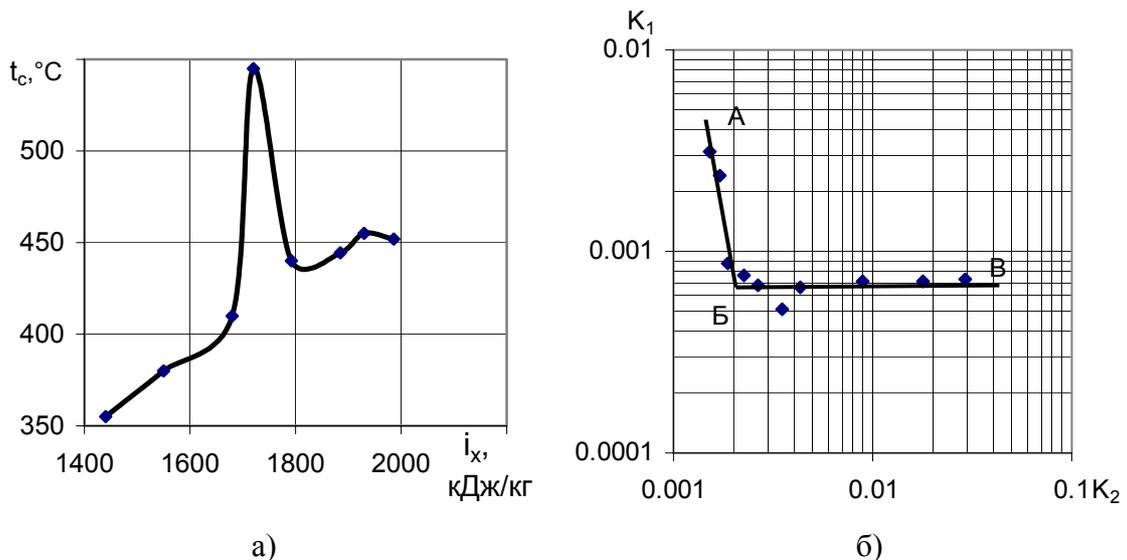
Где: $\Delta i = i_m - i_{жс}$, при $i_m > i_{жс}$;
 $\Delta i = i_{жс} - i_m$, при $i_{жс} > i_m$

На рис.1 и 2 представлены зависимости $t_c = f(i_x)$ и результаты обработки экспериментальных данных в виде зависимости $K_1 = f(K_2)$ для ароматических углеводородов и воды, соответственно.



а) б)
 Рис.1. а) зависимость $t_c = f(i_x)$; б) зависимость $K_1 = f(K_2)$
 рабочая среда толуол

$p/p_{кр} = 1,08$; $\rho u = 253 \text{ кг/м}^2\text{сек}$; $q = 0,167 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$;
 $l_{обог} = 300 \text{ мм}$; $d = 4,0 \text{ мм}$



а) б)
 Рис.2. [7] а) зависимость $t_c = f(i_x)$; б) зависимость $K_1 = f(K_2)$
 рабочая среда вода

$p/p_{кр} = 1,02$; $\rho u = 430 \text{ кг/м}^2\text{сек}$;
 $q = 0,33 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$; $d = 8,0 \text{ мм}$

Из рис. 1 и 2 видно, что при однофазных околокритических давлениях зависимость $K_1 = f(K_2)$ имеет два участка, соответствующих нормальному (участок АБ) и ухудшенному (участок БВ) режиму теплоотдачи. Место пересечения участков АБ и БВ характеризует тот участок парогенерирующих труб, который соответствует началу ухудшенного режима теплоотдачи. Для определения границы начала ухудшенного режима теплоотдачи воды предложено следующее эмпирическое уравнение [2]

$$i_{жс}^{эп} = i_m - 700 \cdot \frac{q}{\rho_{жс} U} \quad (5)$$

Температуру стенки при ухудшенном режиме теплоотдачи (участок БВ рис.1 и 2) можно определить по следующему уравнению [2]

$$i_c = i_{жс} + 1500 \cdot \frac{q}{\rho_{жс} U} \quad (6)$$

При проектировании теплообменных аппаратов и заранее известных значениях режимных параметров можно определить коэффициент запаса до ухудшенного режима.

$$K = \frac{q_{ух}}{q_{расч}} \quad (7)$$

Где: $q_{ух}$ - плотность теплового потока, соответствующего началу ухудшенного режима теплоотдачи, Вт/м²;

$q_{расч}$ - расчетное значение плотности теплового потока, Вт/м².

Для определения $q_{ух}$ можно использовать следующее уравнение [2]

$$q_{ух} = 1,5 \cdot 10^{-3} \rho_{жс} U (i_m - i_{жс}) \quad (8)$$

Как видно из вышеуказанного, при помощи предложенного метода можно определить все необходимые режимные параметры теплообменных аппаратов, работающих в однофазных околокритических давлениях. Однако эта возможность отсутствует при двухфазных околокритических давлениях.

В связи этим, в данной работе также представлены результаты обработки экспериментальных данных при двухфазных околокритических давлениях в виде зависимости температуры стенки от относительной энтальпии $t_c = f(X)$ и $K_1 = f(K_2)$ (рис. 3 и 4).

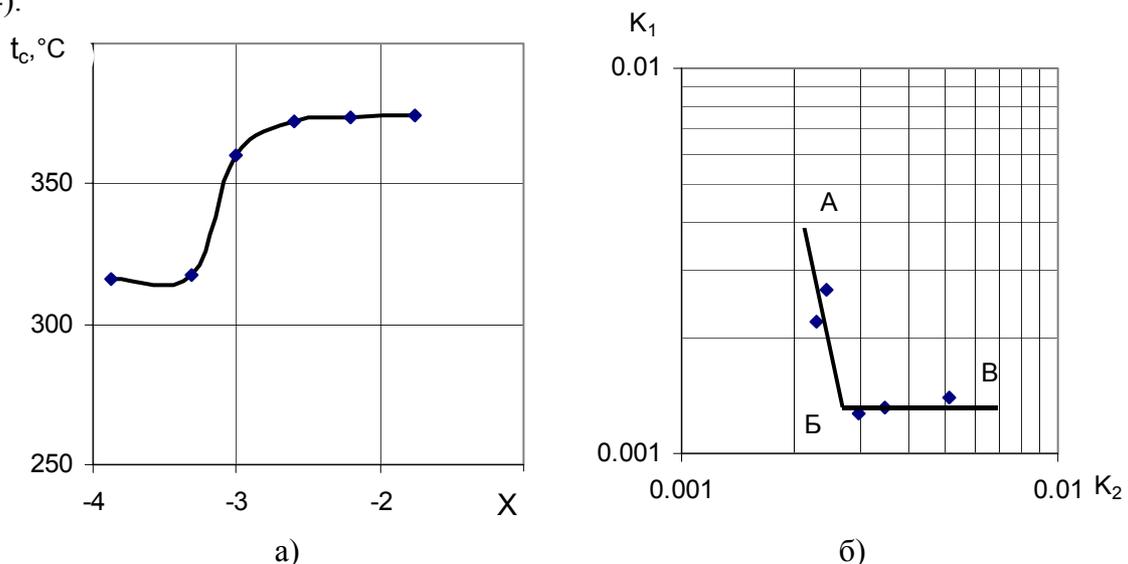


Рис.3. а) зависимость $t_c = f(X)$; б) зависимость $K_1 = f(K_2)$

рабочая среда толуол
 $p/p_{кр} = 0,94$; $\rho_{и} = 155 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$; $q = 0,78 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$;
 $l_{обог} = 300 \text{ мм}$; $d = 4,0 \text{ мм}$

Отметим, что при двухфазных околокритических давлениях для расчета K_2 в формуле (4) значение Δi определялось по следующей формуле:

$$\Delta i = i' - i_{жс}, \quad \text{при } X > 0;$$

$$\Delta i = i_{жс} - i', \quad \text{при } X < 0 \quad (9)$$

Где: i' – энтальпия насыщенной жидкости.

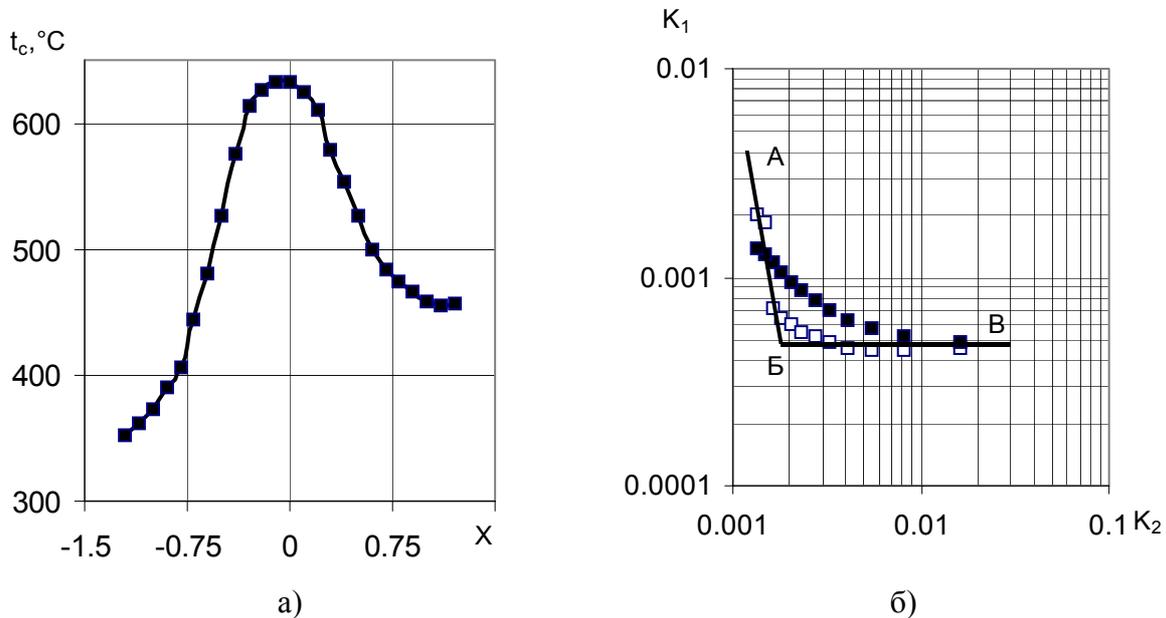


Рис.4. [8] а) зависимость $t_c=f(X)$;
 б) зависимость $K_1=f(K_2)$, ($\square-X<0$; $\blacksquare-X>0$).
 рабочая среда вода
 $p/p_{кр}=0,93$; $\rho u=700 \text{ кг/м}^2\text{сек}$; $q = 0,58 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$;
 $l_{обог} = 1200 \text{ мм}$; $d = 5,0 \text{ мм}$

Как видно из графиков, представленных на рисунка 3 и 4, по характеру распределения температура стенки по длине трубы аналогична данным, полученным при однофазных ОКД. В тоже время зависимость $K_1=f(K_2)$, полученная при двухфазных ОКД, тоже идентична данным, полученным при однофазных ОКД. Сопоставление зависимости $K_1=f(K_2)$, полученной при однофазных и двухфазных ОКД, показывает, что при двухфазных ОКД кризис кипения характеризуется горизонтальным участком БВ, а участок АБ характеризует пузырьковой режим кипения.

В то же время, независимо от давления, граница начала ухудшенного режима теплоотдачи (кризиса кипения) наблюдается при постоянных значениях комплекса K_2 . Так как для воды $K_2^{сп} \approx 2 \cdot 10^{-3}$, а для толуола $K_2^{сп} \approx 3 \cdot 10^{-3}$.

В заключение отметим, что при околокритических давлениях и ухудшенных режимах теплоотдачи характер распределения температуры стенки по длине трубы и зависимость $K_1=f(K_2)$ идентичны. Предложенный метод также можно использовать при расчетах в двухфазных околокритических давлениях. Поэтому в дальнейшем следует продолжить исследование в данной области.

1. Рзаев М.А., Келбалиев Р.Ф., Искендеров М.З., Ашурова У.И. Экспериментальные исследования кипения недогретых ароматических углеводородов. // Труды 3-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Изд. МЭИ, 2002. Т 4, с.162-164.

2. *Рзаев М.А., Келбалиев Р.Ф., Байрамов Н.М., Джабраилов Т.Ф., Ашурова У.И.* Методы определения ухудшения теплообмена при турбулентном течении и сверхкритических давлениях жидкости. //Труды XIV школа-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. М.: Изд. МЭИ, 2003. Т.1 с.109-112.
3. *Дорожук В.Е.* Кризисы теплообмена при кипении влды в трубах. М.:Энергоатомиздат, 1983. -120 с.
4. *Келбалиев Р.Ф., Рзаев М.А., Байрамов Н.М., Ашурова У.И.* Теплоотдача при сверхкритических давлениях ароматических углеводородов. // Труды 3-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Изд. МЭИ, 2002. Т 2, ст. 167-169
5. *Калбалиев Ф.И.* Теплоотдача при сверхкритических давлениях вещества (ароматических углеводороды). Дис. д-ра техн.наук. Баку. 1985. 412с.
6. *Гухман А.А.* Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М. 1974. 327 с.
7. *Щицман М.Е.* Ухудшенные режимы теплоотдачи при закритических давлениях. // Теплофизика высоких температур, 1963, т.1, №2, с.267-275.
8. *Schmidt K.R.* Warmetechnische Untersuchungen an hoch belasteten Kesselheizflächen. Mitt.V.G.B.,1959, Bd 63, p.391.

KRITİKƏTRAFI TƏZYİQLƏRDƏ PİSLƏŞMİŞ İSTİLİKVERMƏ REJİMLƏRİ

BAYRAMOV N.M., AŞUROVA Ü.İ., RZAYEV M.A., KƏLBƏLİEV R.F.

Məqalədə kritikətrafi təzyiqlərdə aromatik karbohidrogenlərin istilikvermə prosesinin nəticələrinin təhlili və onun su ilə alınmış nəticələrlə müqayisəsi təqdim olunub.

THE WORSENEED MODES OF HEAT DISSIPATION NEAR-CRITICAL PRESSURE

BAYRAMOV N.M., ASHUROVA U.I., RZAYEV M.A., KELBALIYEV R.F.

In the given work results of the analysis heat dissipation aromatic hydrocarbons are submitted at near-critical pressure, and also their comparison to the data received with water.