

УДК 536.242.08

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ****БАБАЕВА С.Ш.***Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия*

P -давление, МПа; t -температура, °С; q -плотность теплового потока, Вт/м², L -длина трубы, мм; d -диаметр трубы, мм; x –расстояние от входа трубы, мм; u -массовая скорость, кг/(м² с); t_m – температура соответствующая максимуму теплоемкости при сверхкритических давлениях жидкости, °С.

Индексы: с-стенка, ж-жидкость; кр-критическая; вх-вход; в-внутренний.

Приводятся результаты экспериментальных исследований теплообмена при ламинарном и турбулентном режимах движения и при пульсации давления жидкости.

В химической и нефтяной промышленности широко применяют теплообменные аппараты, работающие при различных параметрах. В этих аппаратах происходит подогрев или охлаждение углеводородных жидкостей. Надежность и эффективность работы, а также температурный режим теплообменных аппаратов зависят от интенсивности процесса теплообмена. Эффективность протекания процессов и экономичность работы аппаратов зависят от многих факторов. Перспективное развитие техники требует решения этих вопросов. Один из методов повышения эффективности протекания процессов и экономичности работы аппаратов является переход на сверхкритические давления (СКД) теплоносителя. Создание теплоэнергетических установок и компактных теплообменных аппаратов, а также охлаждение высокотемпературной поверхности оборудования, применяемого в современной технике, требует использования в них теплоносителей при сверхкритических давлениях. Многочисленные работы по теплообмену доказывают возникновение высокочастотного термоакустического автоколебания (ТААК) при СКД воды и углеводородов. [1, 2].

Пульсационный режим теплообмена в основном наблюдается в опытах при СКД углеводородов. Поэтому целесообразным является экспериментальное исследование особенности теплообмена при СКД углеводородов. В нашей работе при исследовании теплообмена в качестве модельной жидкости был выбран толуол ($P_{кр}=4.23$ МПа, $T_{кр}=593.8$ К)

Описание экспериментальной установки, методика проведения опытов и измерения отдельных величин даны в [3].

Высокочастотная термоакустическая неустойчивость создает пульсации давления жидкости, разрушает структуры потока, интенсифицирует процесс теплообмена. Одной из причин возникновения высокочастотного термоакустического автоколебания в потоке может быть сильное изменение теплофизических свойств жидкости при околокритическом состоянии. Это явление особенно заметно в опытах с холодной жидкостью. При соприкосновении холодной жидкости с горячей стенкой объем ее увеличивается в пристеночной части потока. В околокритическом состоянии вещества скачкообразное увеличение объема жидкости в пристеночной части потока и уменьшение его вдали от стенки может стать причиной возникновения пульсации давления. Такие процессы имеют место при $P > P_{кр}$, т.к. t_m и $t_c > t_m$. В указанном

случае в поперечном сечении часть потока (определенный слой жидкости) переходит через критическое состояние. Место расположения этого слоя по радиусу трубы зависит от температуры жидкости, где имеет место резкое изменение теплофизических свойств жидкости. При постоянных давлениях изменение физических свойств влияет на массовые, вязкостные и инерционные силы, которые характеризуют движение жидкости. Сильное изменение плотности вызывает ускорение потока и возникновение свободной конвекции. Эти и другие факторы в целом влияют на гидродинамику потока и на интенсивность теплообмена. Влияние этих факторов на гидродинамику потока зависит от области охвата изменений физических свойств жидкости по поперечному сечению потока. Область охвата сильных изменений физических свойств жидкости, в свою очередь, зависит от массовой скорости, давления и температуры жидкости, и с увеличением теплового потока перемещается по сечению потока от стенки к оси трубы. Встречаются такие случаи, в которых по значению температуры на оси трубы жидкость находится в докритическом, а около стенки - за критическом состоянии. Вышеуказанные случаи приводят к различным характерам течения и интенсивности теплообмена при ламинарном, переходном и турбулентном режимах движения жидкости. Иначе говоря, в отдельных случаях можно наблюдать влияние ускорения потока, влияние свободной конвекции, пульсации давления на интенсивность теплоотдачи. Ниже приводятся некоторые результаты, полученные при различных режимах движения толуола в вертикальной трубе.

На рис.1 показано изменение температуры стенки по длине трубы для подъемного движения холодного толуола при ламинарном режиме течения. При $t_c < t_m$ ($t_m = 365^\circ\text{C}$) изменение температуры стенки по длине трубы соответствует законам конвективного теплообмена однофазного потока (кривые 1 и 2). При некоторых значениях t_c и q/r_0 под влиянием свободной конвекции нарушается монотонный характер распределения температуры стенки (кривые 3, 4)

Теплоотдача ароматических углеводородов при $t_c < t_m$ и $t_c > t_m$ сопровождается колебанием давления жидкости и температуры стенки. При пульсационных режимах с увеличением теплового потока температура стенки в определенных участках трубы изменяется мало и при различных q графики $t_c=f(l)$ сливаются, т.е. наступает улучшенный режим теплоотдачи. Такие же результаты получаются при турбулентном режиме движения (рис.2), в котором при приближении температуры стенки к t_m исследуемой жидкости на экспериментальной трубе появляется звук, и теплообмен сопровождается термоакустическими автоколебаниями. С увеличением теплового потока интенсивность термоакустического автоколебания сначала увеличивается, а затем сила звука переходит в тихое шипение, как при процессе кипения. В таких опытах температура стенки уменьшалась. (кривая 4)

На рис.3 представлен график изменения $t_c=f(q)$, построенный для расстояния $X_l=90\text{мм}$ от входа трубы при ламинарном режиме движения толуола. На участке АБ графика при температуре ниже псевдокритической ($t_m=335^\circ\text{C}$) зависимость $t_c=f(q)$, имеет прямолинейный характер. В точке «Б» температура стенки приближается к температуре t_m , после чего с увеличением теплового потока t_c изменяется медленно и получается характерный участок БВ, в конце которого температура стенки достигает значения $t_c \approx t_m$.

Изменение характера кривой на участке БВ может быть объяснено изменением физических свойств жидкости в пристеночном слое и влиянием свободной конвекции.

Дальнейшее увеличение теплового потока приводит к возрастанию температуры стенки, в результате чего образуется участок ВГ. При $t_c > t_m$ в пристеночном слое физические свойства жидкости переходят через критическое состояние и с увеличением теплового потока температура стенки возрастает.

При больших тепловых потоках и высоких температурах стенки ($t_c > 450^\circ\text{C}$) ход температурной кривой еще раз изменяется и получается участок ГДЕ. На этом участке

графика температура стенки с увеличением теплового потока сначала уменьшается от значения, соответствующего точке «Г», до значения «Д», а затем медленно возрастает (улучшение теплоотдачи).

Аналогичный характер изменения хода кривой по графику $t_c=f(q)$ наблюдается в опытах при турбулентном режиме движения жидкости.

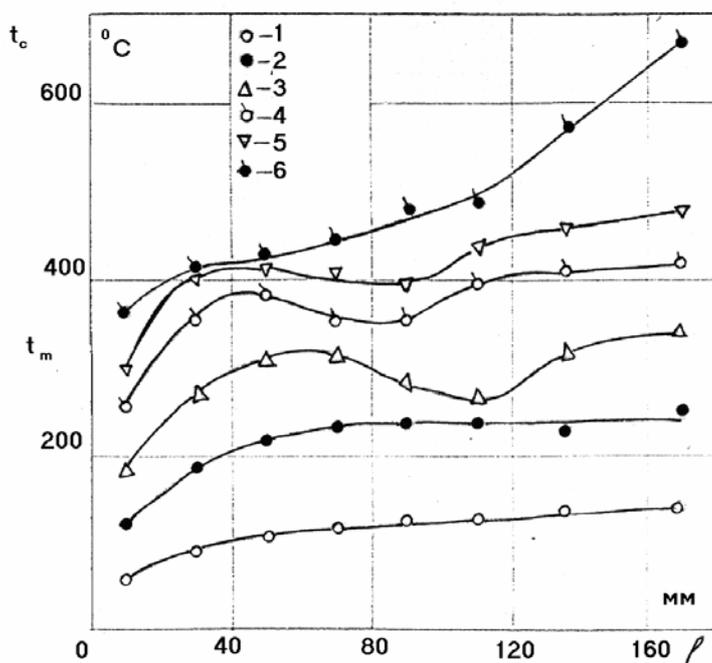


Рис.1. Изменение температуры стенки по длине трубы при подъемном движении толуола $P=70$ бар, $\rho_{ж}=96$ кг/м² сок, $t_{ж}^{вж}=18^{\circ}\text{C}$
 1 - $q=0.37 \cdot 10^5$; 2 - $q=0.76 \cdot 10^5$; 3 - $q=1.25 \cdot 10^5$;
 4 - $q=1.74 \cdot 10^5$; 5 - $q=2.2 \cdot 10^5$; 6 - $q=2.8 \cdot 10^5$.

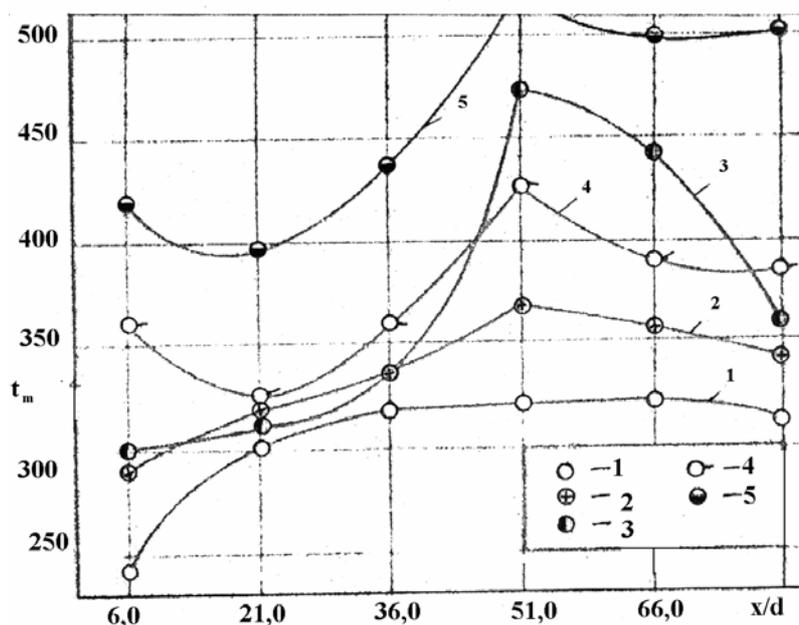


Рис.2. Зависимость $t_c=f\left(\frac{x}{d}\right)$ для подъемного движения толуола
 1- $q \approx 1.58 \cdot 10^6$; 2- $q \approx 2.12 \cdot 10^6$; 3- $q \approx 3.8 \cdot 10^6$;
 4- $q \approx 4.0 \cdot 10^6$; 5- $q \approx 5.53 \cdot 10^6$ кг/м²

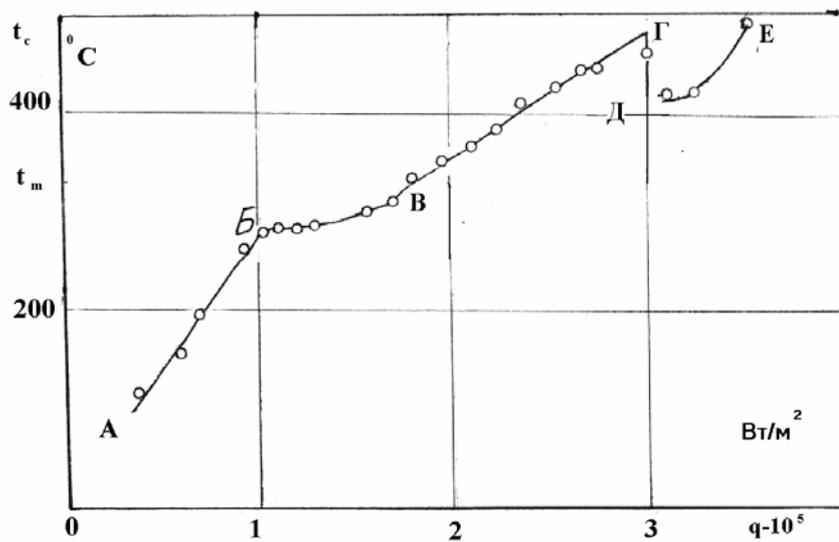


Рис.3. Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для подъемного движения толуола при $P=50$ бар, $\rho_l=97$ кг/м³ сож $t_{ж}^{вж}=15^{\circ}\text{C}$.

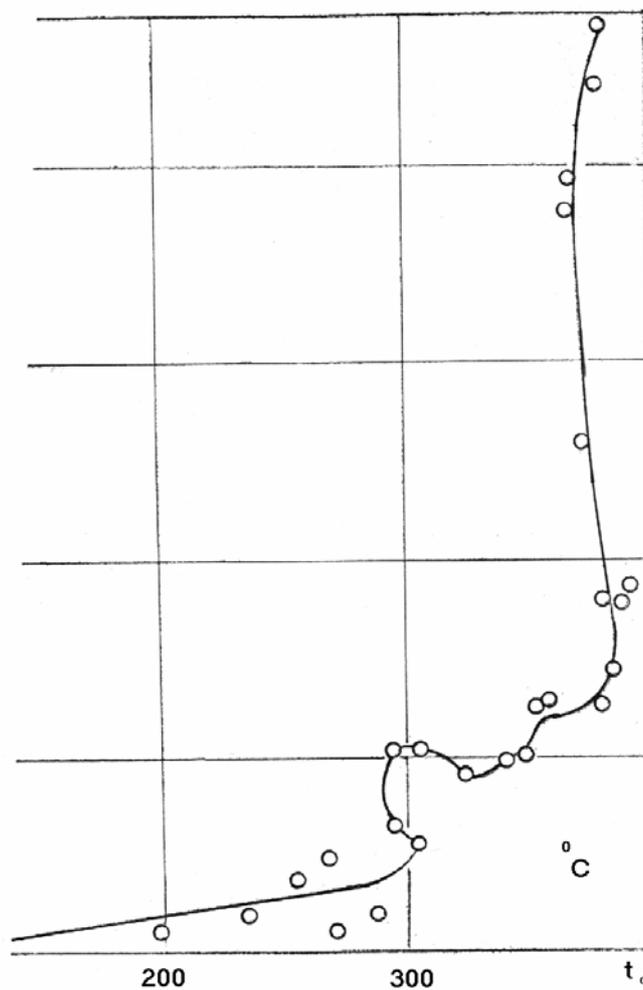


Рис.4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры стенки для подъемного движения толуола $P=70$ бар, $\rho_l=96$ кг/м³ сож, $t_{ж}^{вж}=18^{\circ}\text{C}$

Сравнение графиков зависимостей $t_c=f(q)$ для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения показывает, что общий характер изменения этих кривых для указанных режимов движения одинаков.

На рис.4 представлены графики зависимости местного коэффициента теплоотдачи от температуры стенки. Видно, что при $t_c < t_m$ зависимость α от t_c такая же, как и при обычном конвективном теплообмене. По мере приближения значения t_c к t_m исследуемой жидкости α увеличивается и переходит через свой первый максимум. Далее с увеличением t_c α несколько снижается и при некоторых значениях t_c коэффициент теплоотдачи вторично возрастает. Причем абсолютное значение коэффициента теплоотдачи при вторичном улучшении значительно больше, чем при первичном. В указанных опытах при $t_c \approx t_m$ возникли пульсации давления жидкости и температуры стенки, которые с увеличением теплового потока сопровождались термоакустическими автоколебаниями. Измерение амплитудно-частотных характеристик процесса показывает, что амплитуда колебаний давления изменяется в пределах (5-30)% от абсолютного давления. В целом, процесс сопровождается улучшением теплоотдачи, что дает возможность охлаждать высокотемпературные поверхности аппаратов, работающих при больших тепловых нагрузках, и поддерживать в них допустимые значения температуры стенки. Кроме того, можно создать компактные малогабаритные теплообменные аппараты, работающие с высокой тепловой экономичностью.

1. *Калбалиев Ф.И.* Теплоотдача при сверхкритических давлениях вещества (ароматические углеводороды-дисс. Докт. техн. наук. – Баку-1985. с.412.
2. *Кафенгауз Н.Л.* Обзор экспериментальных исследований термоакустических колебаний при теплоотдаче к турбулентному потоку жидкости в трубах /Сб. науч. тр. «Вопросы тепло- и массопереноса в энергетических установках» Вып. 19. М., 1974. с. 106-130.
3. *Вердиев Ч.М, Калбалиев Р.Ф.* Надежность энергетического оборудования, работающего при пульсационном режиме и сверхкритических давлениях вещества. Тр. конф. «Рациональное использование энергоресурсов и надежность электрооборудования» Баку, АГНА, 2000. с.154-158.

İSTİLİK MÜBADİLƏSİ APARATLARINDA İSTİLİK PROSESLƏRİNİN TƏDQIQI

BABAYEVA S.Ş.

Məqalədə, mayenin laminar və turbulent hərəkəti zamanı, təzyiqin dəyişən halında, istilik mübadiləsinin təcrübi tədqiqindən alınan nəticələr verilmişdir.

AN INVESTIGATION OF HEATING PROCESSES IN HEATING EXCHANGE EQUIPMENT

BABAYEVA S. SH.

Results of experimental researches of heat exchange at laminar and turbulent modes of movement and at a pulsation of a liquid pressure are presented.