

*Р.Ф. Келбалиев, Р.Ю. Алиев, М.Б. Исмаилов*

Азербайджанская государственная нефтяная академия, Баку, Азербайджан

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЗМЕЕВИКОВОЙ ТРУБЕ

### АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты исследования теплообмена при кипении недогретого толуола при давлениях, близких к критическому, в горизонтально змеевиковых трубах. Выявлено неравномерное распределение температуры стенки по длине и периметру горизонтальной змеевиковой трубы.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Кипение жидкости в змеевиковой трубе нашло широкое применение в технике. Теплообменные аппараты со змеевиковыми каналами по конструктивно-технологическим и эксплуатационным характеристикам значительно превосходят прямотрубные теплообменники, применяемые в различных областях промышленности. К достоинствам змеевиковых теплообменных аппаратов следует отнести их компактность, сравнительно простую компенсацию температурной деформации и более высокую интенсивность теплоотдачи по сравнению с прямотрубными теплообменниками.

Многочисленные экспериментальные данные, характеризующие особенности теплообмена в прямых участках трубы, не могут быть непосредственно использованы для определения температурных условий в изогнутых участках труб, имеющих во многих конструкциях теплотехнического оборудования. В то же время известно, что движение рабочей среды в криволинейных каналах связано с некоторыми особенностями, оказывающими существенное влияние на гидродинамику и теплообмен.

Интерес представляет изучение процесса кипения при течении недогретой жидкости в области давлений, близких к критическому, где теплофизические свойства насыщенной жидкости существенно изменяются. Например, плотность и вязкость уменьшаются, теплоемкость увеличивается, поверхностное натяжение и теплота парообразования стремятся к нулевому значению. В опытах с недогретой жидкостью эти эффекты проявляются в тонком пристеночном слое, в котором парообразование интенсифицируется. Кроме вышеуказанных факторов на интенсивность теплоотдачи влияют режим вынужденного движения и особенности течения в змеевиковой трубе, имеющей вогнутые и выпуклые теплоотдающие поверхности.

Экспериментально было установлено, что в изогнутых трубах при различных режимах течения жидкости вторичная циркуляция возникает при некоторых критических числах Рейнольдса и, в свою очередь, зависит от внутреннего диаметра трубы и радиуса закругления змеевика.

Характеристики при кипении жидкости в этих условиях могут отличаться от обычных, соответствующих кипению в трубе. Поэтому процессы при кипении насыщенной и недогретой жидкости целесообразно исследовать отдельно.

Надежность теплоэнергетических установок определяется в основном температурой их стенок. Поэтому при проектировании и эксплуатации теплоэнергетических установок необходимо сохранять нормальный температурный режим стенки. В парогенерирующих аппаратах при нарушении режимов работы возможно возникновение кризиса теплоотдачи и скачкообразное возрастание температуры металла, что может разрушить стенки аппарата. Исследование температурных режимов стенки канала, охлаждаемой при высоких массовых скоростях и больших недогревах, т.е. изучение кризиса теплоотдачи при течении с большими массовыми скоростями недогретой жидкости, является актуальной задачей. При высоких массовых скоростях и больших недогревах вклад однофазной конвекции в процесс переноса тепла соизмерим со вкладом от пузырькового кипения.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе рассматриваются некоторые особенности теплоотдачи при кипении недогретого толуола ( $P_{кр} = 4.24$  МПа,  $t_{кр} = 320.8$  °С) в горизонтальной змеевиковой трубе.

В опытах режимные параметры изменялись в следующих пределах для змеевиковой трубы:  $P/P_{кр} = 0.47 - 0.95$ ,  $\rho u = 250 - 328$  кг/(м<sup>2</sup>с),  $\Delta t/t_{кр} = 0.13 - 0.8$ ,  $d_b/d_n = 4/6$  мм,  $D_{из} = 115$  мм,  $l_{об} = 525$  мм.

Описание экспериментальной установки, методика проведения опытов и измерения отдельных величин приведены в [1, 2]. Все узлы экспериментальной установки изготовлены из нержавеющей стали марки 1Х18Н10Т. Равномерный обогрев экспериментального участка осуществлялся электрическим током низкого напряжения. Температуры жидкости и стенки измерялись хромель-алюмелевыми термопарами с диаметрами проволоки 0.2 мм. В каждом сечении по длине горизонтального змеевика температура стенки измерялась на нижних, верхних и боковых образующих трубы.

Опыты проводились при постоянных режимных параметрах, но при постепенно увеличивающемся тепловом потоке. В каждом опыте проверялся тепловой баланс, т.е. производилось сравнение теплового потока, рассчитанного по электрической мощ-

ности и потока, воспринятого жидкостью. Различие между ними не превышало 3%. Погрешность вычисления теплового потока по значению электрической мощности оценивалась в 1,8%.

На рис. 1 представлены графики изменения температуры стенки по длине змеевика  $X = \frac{1}{Pe} \frac{x}{d}$  при движении толуола для верхних и нижних образующих. Из рисунка видно, что при низких тепловых потоках изменение  $t_c$  по длине трубы такое же, как при нормальном режиме теплоотдачи. По мере увеличения теплового потока распределение температуры стенки по длине трубы несколько отличается от предыдущего случая. При достижении температуры стенки температуры насыщения  $t_s$  исследуемой жидкости наблюдается кипение жидкости. Устойчивый процесс кипения продолжается до определенных значений  $q$ , после чего возникает кризис теплоотдачи и температура стенки увеличивается.

С увеличением теплового потока область возрастания температуры стенки перемещается против движения жидкости, длина участка устойчивого кипения при этом сокращается, но на нижних образующих эта длина больше, чем на верхних. Поэтому на этих участках горизонтальной трубы наблюдается разность температуры стенки между верхними и нижними ее образующими. Температуры боковых поверхностей змеевиковой трубы имели другие значения, отличающиеся от  $t_c$  на верхних и нижних.

На рис. 2 проиллюстрировано наблюдаемое ухудшение теплообмена на нижней, верхней и внутренней боковой образующих периметра трубы горизонтального змеевика на одинаковых расстояниях от входа в трубу при разных тепловых потоках. Из этого графика следует, что в горизонтальном змеевике на определенном сечении под действием инерционных сил, которые влияют на изменение гидродинамической структуры потока, теплоотдача ухудшается сначала на внутренней боковой поверхности, а затем на верхней и нижней образующих.

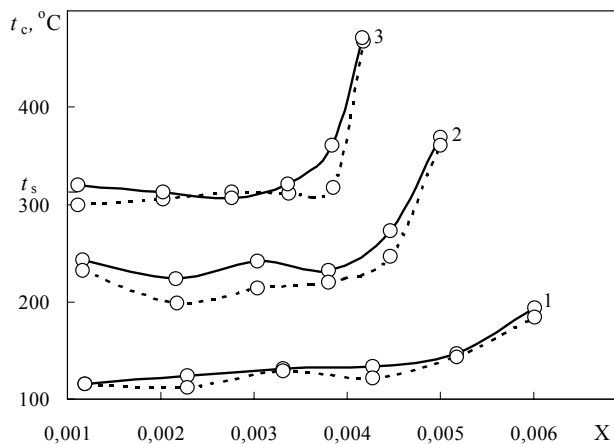


Рис. 1. Изменение температуры стенки по длине горизонтального змеевика в опытах с толуолом при  $P = 3,5$  МПа,  $\rho_{fl} = 287,47$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $l_{об} = 525$  мм,  $d_B/d_H = 4/6$  мм; сплошная линия – верхняя образующая, пунктирная – нижняя, 1 –  $q = 0,58 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, 2 –  $1,17 \cdot 10^5$ , 3 –  $1,75 \cdot 10^5$

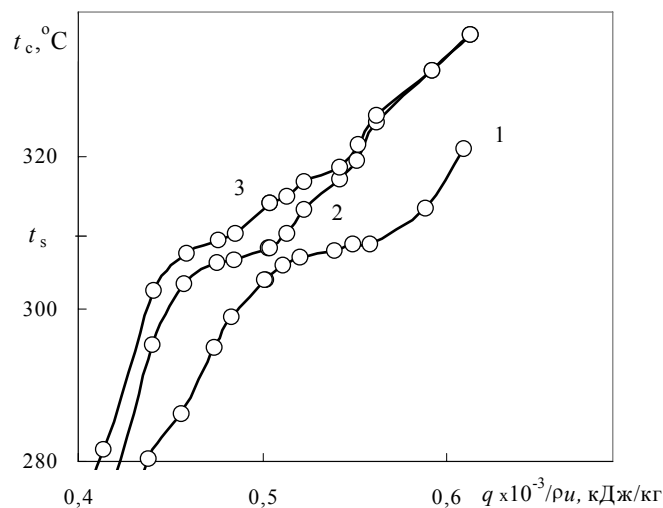


Рис. 2. Зависимость температуры стенки от отношения теплового потока к массовой скорости при  $P = 3,5$  МПа,  $\rho_{fl} = 287,47$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $l_{об} = 525$  мм,  $d_B/d_H = 4/6$  мм,  $x/d = 93,75$ ; 1 – нижняя образующая, 2 – верхняя, 3 – внутренняя боковая

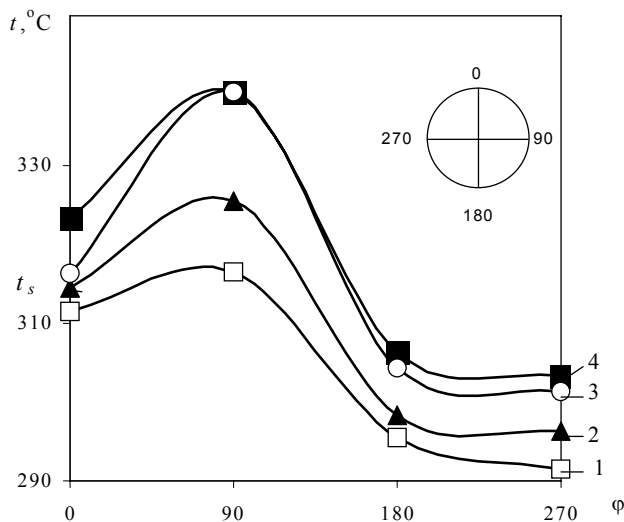


Рис. 3. Изменение температуры стенки по периметру поперечного сечения горизонтальной змеевиковой трубы при  $P = 4,0$  МПа,  $\rho_{fl} = 250,88$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $l_{об} = 525$  мм,  $d_B/d_H = 4/6$  мм,  $x/d = 93,75$ ; (0°) – верхняя образующая, (90°) – внутренняя боковая, (180°) – нижняя, (270°) – наружная боковая, 1 –  $q = 1,24 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, 2 –  $1,27 \cdot 10^5$ , 3 –  $1,30 \cdot 10^5$ , 4 –  $1,32 \cdot 10^5$

На интенсивность теплоотдачи эффективно влияют центробежные силы, которые зависят от геометрических размеров трубы, диаметра изгиба и режима движения жидкости. При этих условиях омывание внутренней поверхности стенки трубы жидкостью не одинаково по периметру, что наглядно продемонстрировано на рис. 3. При обычных условиях в криволинейной части горизонтального змеевика течение жидкости имеет сложный характер. Так, на наружной боковой стороне (270°) сечения, под действием центробежных сил поверхность труб хорошо омывается жидкостью. В то же время на противоположной внутренней боковой стороне

(90°) имеется пограничный слой с высоким тепловым сопротивлением, который способствует повышению температуры стенки. Верхний (0°) и нижний (180°) образующие периметры находятся между этими областями. При определенных условиях, т.е.  $t_c < t_s$  возникает свободная конвекция, конвективные потоки которых направляются снизу вверх и нижняя часть сечения трубы (180°) хорошо омывается жидкостью. В то же время верхняя часть сечения (0°) заполняется нагретыми объемами жидкости, что ухудшает омывание поверхности жидкостью, вследствие чего снижается интенсивность теплообмена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены новые экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении недогретого толуола в области до критических давлений в горизонтальной змеевиковой трубе.

2. Выявлено, что в горизонтальном змеевике ухудшение теплообмена на нижней, верхней и внутренней боковой образующих периметра, на одинаковых расстояниях от входа в трубу наблюдается при разных тепловых потоках

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$P$  – давление, МПа;  
 $t$  – температура, °С;

$q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$d$  – диаметр трубы, мм;

$l$  – длина трубы, мм;

$x$  – расстояние от входа в трубу, мм;

$D$  – диаметр змеевика;

$\Delta t = (t_s - t_{ж}^{вх})$  – недогрев жидкости до температуры насыщения, °С;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$u$  – скорость, м/с;

$\rho u$  – массовая скорость, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Индексы:

с – стенка;

ж – жидкость;

вх – вход;

в – внутренний;

н – наружный;

об – обогреваемая;

см – смесь;

s – насыщение;

кр – критическая.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Келбалиев Р.Ф.** Теплоотдача при кипении жидкости в области давлений, близких к критическому // Теплоэнергетика. 2002. № 3. С. 39.
2. **Келбалиев Р.Ф., Искендеров М.З.** Исследование некоторых особенностей кризиса теплоотдачи при кипении недогретых углеводородов в области давлений, близких к критическому // Теплофизика высоких температур, 2005. Т. 43. № 3. С. 459–465.