

## УСТОЙЧИВОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

### АННОТАЦИЯ

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований устойчивости естественной циркуляции жидкости внутри горизонтального теплообменника с вытяжной шахтой, расположенной под углом 90 градусов к поверхности теплообменника. Приводятся описание опытной установки и методика проведения эксперимента, а также результаты исследований.

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

К настоящему времени процессы теплообмена при естественной циркуляции (ЕЦ) внутри обогреваемых труб изучены недостаточно хорошо. Большое число работ в этой области описано Б.С. Петуховым [1].

Использование ЕЦ дает ряд важных преимуществ: отсутствие побудителя движения охлаждающей жидкости и, как следствие, отсутствие средств автоматизации, контроля и управления. Таким образом, важность поставленной задачи, недостаток данных для расчета устойчивости ЕЦ требуют дополнительного экспериментального и теоретического изучения.

### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Естественная циркуляция охлаждающей жидкости возникает и развивается при наличии небольших градиентов статического давления, возникающих из-за разной плотности жидкости в окружающей среде и элементах теплообменника [2]. При ламинарном режиме течения движение жидкости можно считать вязкостно-гравитационным [3].

Исследуемая модель (см. рис. 1) состоит из обогреваемого участка (1) и расположенной под прямым углом к обогреваемому участку вытяжной шахты (2).

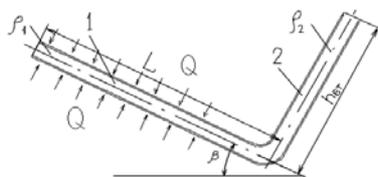


Рис. 1. Теплообменник с обогреваемым участком (1) и вытяжной шахтой (2)

Жидкость, находящаяся на обогреваемом участке теплообменника, за счет подвода тепла  $Q$  прогревается, вследствие чего возникает разность плотностей между окружающей средой, обогреваемым участком  $\rho_1$  и вытяжной шахтой  $\rho_2$ . Эта раз-

ность порождает перепад давлений, который обуславливает движение жидкости от обогреваемого участка к вытяжной шахте (такое движение жидкости будем называть прямым). При отклонении обогреваемого участка от горизонтального положения в сторону вытяжной шахты (угол  $\beta$ ) характер движения жидкости постепенно меняется, и при определенном угле ( $\beta_{\text{опр}}$ ) движение жидкости может смениться на противоположное исходному, т.е. происходит опрокидывание циркуляции [2].

Целью данного исследования является определение параметров, влияющих на угол опрокидывания, а также получение зависимости угла опрокидывания от этих параметров. К основным параметрам, от которых зависит угол опрокидывания, можно отнести: геометрические размеры теплообменника, тепловую нагрузку и теплофизические параметры теплоносителя.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования были проведены на установке, схема которой представлена на рис. 2. К верхней части металлического бака цилиндрической формы (9) диаметром 0,2 метра и длиной 2,1 метра посредством небольшого поворотного устройства (5), обеспечивающего изменение угла наклона исследуемой трубки от 0 до 90 градусов, присоединяется съемная теплообменная трубка с вытяжной шахтой (1), другой конец которой присоединен гибким шлангом (8) к нижней части бака. Вся установка заполняется водой.

Теплообменные трубки выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 22×2 мм и имеют длину  $L = 600, 800, 1100$  мм. Вытяжная шахта, также труба, выполнена из нержавеющей стали и имеет длину  $h_{\text{вт}} = 300, 550$  мм. По длине труб (1) сделаны кольцевые пазы, куда запаяны хромель-копелевые термопары, подключенные к многоканальному измерителю (2).

После этого на трубку наматывалась нихромовая электрическая спираль. Поверх спирали накладывался слой термоизоляции и теплоизоляции (4). На входе и выходе теплообменной трубы установлены термопары в металлическом чехле для измерения температуры жидкости. Электрическая спираль соединена с лабораторными вольтметром, амперметром типа Э59 и ЛАТром переменного напряжения (3).

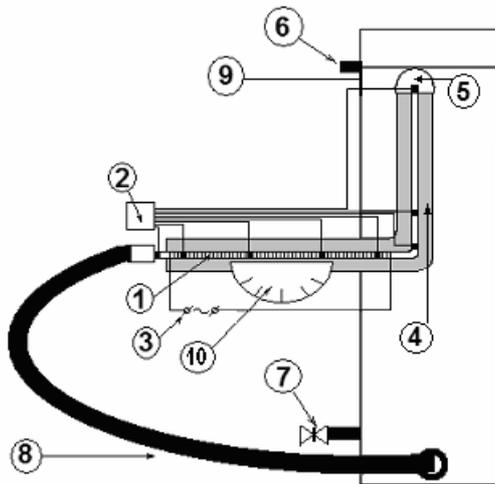


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования естественной циркуляции воды: 1 — опытный теплообменник; 2 — система термодатчиков, подключенных к измерителю многоканальному (УКТ 38); 3 — нихромовая спираль, подключенная к источнику переменного тока; 4 — теплоизоляция; 5 — поворотное устройство; 6 — патрубок стока воды; 7 — патрубок подачи воды; 8 — резиновый шланг; 9 — бак,  $V = 0.065\text{ м}^3$ ; 10 — лимб измерения угла наклона

На обогреваемой части теплообменника закреплен лимб (10) для измерения угла отклонения от горизонтального положения. Для поддержания постоянной температуры воды в баке предусмотрена система протока воды, состоящая из канала подвода воды (7) и канала вывода воды (6).

### 3.2. Методика проведения эксперимента

Упомянутая выше установка собирается и заполняется водой. Первоначально обогреваемый участок выставляется в горизонтальное положение. К спирали подводится электрический ток, идущий на обогрев трубки, и измеряется общий подводимый тепловой поток. С помощью термодатчиков, введенных в поток, измеряются температура на входе в обогреваемый участок и выходе из вытяжной шахты, а также температуры стенки теплообменной трубы.

Далее теплообменник отклоняется от горизонтального положения в сторону вытяжной шахты. Угол опрокидывания определялся по изменениям температур жидкости на входе в теплообменник и выходе из вытяжной шахты. О прямом движении воды свидетельствует то, что температура на входе в теплообменник меньше, чем на выходе из вытяжной шахты. При отклонении теплообменника в сторону вытяжной шахты, как показано на рис. 1, отношение этих температур постепенно меняется. Изменения фиксируются до момента, когда температура на выходе становится меньше температуры на входе. Угол, при котором выполняется это равенство температур, и является углом опрокидывания.

Опыты проводились при переменных тепловых потоках за счет изменения напряжения на спирали

ЛАТРОм и при изменении угла наклона теплообменной трубы.

Теплопотери через теплоизоляцию определяют экспериментально: проводится опыт с закрытой с обоих концов теплообменной трубой, чтобы исключить отвод тепла естественной циркуляцией в окружающую среду.

Для определения влияния диаметра вытяжной шахты на значение угла опрокидывания проводились исследования, в которых изменялся внутренний диаметр трубы вытяжной шахты ( $d_1 = 18\text{ мм}$ ,  $d_2 = 30\text{ мм}$ ).

Для определения степени стационарности процесса проводилось дополнительное исследование, в котором эксперимент проводился при разной скорости поворота теплообменника. При этом температуры фиксировались при отклонении теплообменника на угол в 1 градус с интервалами времени 20, 10, 5 и 1 мин.

### 3.3. Результаты экспериментов

Проведенные опыты по исследованию опрокидывания ЕЦ на воде дают возможность качественного описания этого явления:

- по мере увеличения наклона в сторону вытяжной шахты появляются, а затем и увеличиваются пульсации температуры, достигая максимальных значений при углах, близких к опрокидыванию (см. рис. 3); уменьшается движущий напор естественной циркуляции воды  $\Delta\rho_{\text{дв}}$ ;
- при достижении определенного угла появляются встречные токи, средняя скорость в трубе, постепенно уменьшаясь, становится равной нулю;
- после остановки жидкость нагревается, и движение в трубе возобновится в сторону, противоположную исходному состоянию.

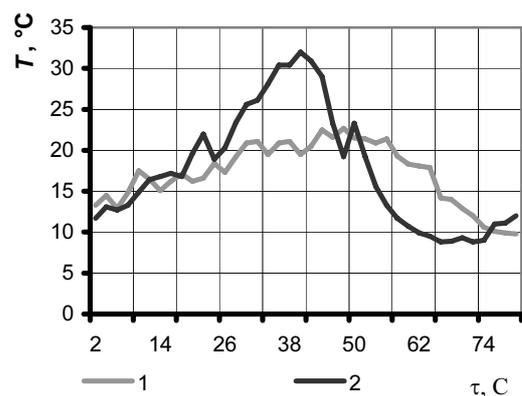


Рис. 3. Пульсации температуры воды на входе в теплообменник для  $Q_1 = 500\text{ Вт}$  (1) и  $Q_2 = 800\text{ Вт}$  (2) при углах, близких к опрокидыванию

Из табл. 1 видно, что первые признаки неустойчивости появляются при углах, близких к опрокидыванию. Это отчетливо видно для теплообменников длиной 800 и 1100 мм.

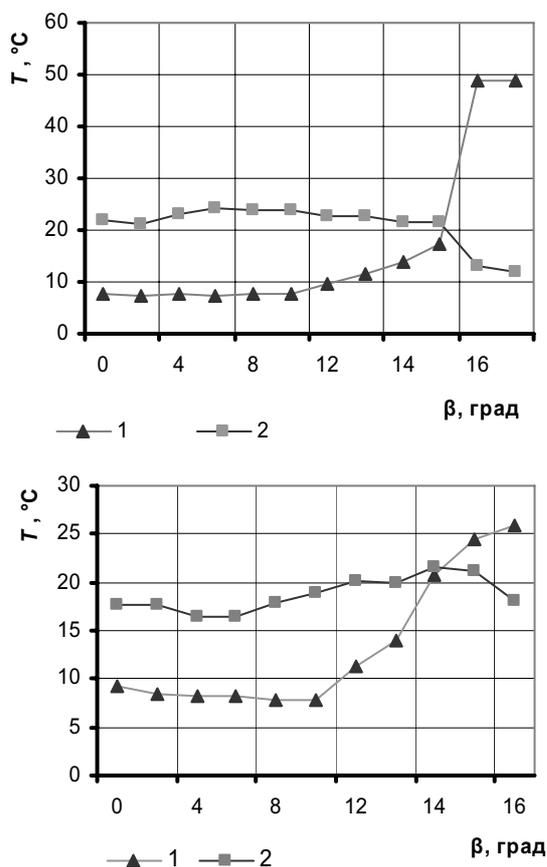


Рис. 4. Характеристика изменения температур на входе (1) и выходе (2) из теплообменника при отклонении от горизонтального положения (при  $Q = 300$  Вт — верхний график и при  $Q = 900$  Вт — нижний график)

Таблица 1. Зависимость угла и угла начала пульсации опрокидывания от тепловой нагрузки для теплообменников различной геометрии

Показатель	Тепловая нагрузка					
	300	400	500	600	700	800
$L = 800$ мм, $h_{вг} = 550$ мм						
пульсация	12	12	12	13	12	12
$\beta_{опр}$ (град)	15	15	16	16	16	16
$L = 800$ мм, $h_{вг} = 350$ мм						
пульсация	10	10	10	10	9	9
$\beta_{опр}$ (град)	14	13	13	13	14	13
$L = 1100$ мм, $h_{вг} = 350$ мм						
пульсация	9	7	7	7	6	6
$\beta_{опр}$ (град)	10	10	9	10	8	9

Как видно из таблицы 1, в диапазоне тепловых нагрузок от 300 до 900 Вт существенных изменений угла опрокидывания не наблюдалось. Увеличение тепловой нагрузки влияет на резкость опрокидывания циркуляции. При малых тепловых нагрузках

температуры на входе и выходе из теплообменника сближаются более плавно при его отклонении, при больших — скачкообразно (см. рис. 4).

Исследование с изменением диаметра вытяжной шахты показало, что увеличение диаметра существенно не влияет на угол опрокидывания, однако имеется тенденция к уменьшению угла опрокидывания в пределах 1—2 градусов, которую можно объяснить увеличением тепловых потерь в вытяжной шахте, а вследствие этого, и движущего напора.

Исследование стационарности показало, что при повороте с интервалами времени 20, 10, 5 мин углы опрокидывания совпали, а при повороте с интервалом 1 мин углы опрокидывания получались как больше, так и меньше в интервале 1—2 градусов.

Обработка данных показала, что на теплотери приходится от 4 до 11 процентов подводимого тепла в зависимости от геометрии установки и тепловых нагрузок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлена динамика развития и опрокидывания естественной циркуляции (для теплообменника заданных геометрических параметров).
2. Выявлено, что при заданных геометрических параметрах теплообменника, угол опрокидывания не зависит от тепловой нагрузки (для тепловых нагрузок в диапазоне от 300 до 900 Вт).
3. Показано, что угол опрокидывания практически не зависит от диаметра вытяжной шахты.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ЕЦ — естественная циркуляция;  
 $L$  — длина горизонтальной части теплообменника, м;  
 $h_{вг}$  — длина вытяжной шахты, м;  
 $\rho$  — плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $T$  — температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\tau$  — время, с;  
 $V$  — объем,  $\text{м}^3$ ;  
 $Q$  — мощность, Вт;  
 $\beta$  — угол отклонения теплообменника, град;  
 $\Delta p_{дв}$  — движущий напор естественной циркуляции воды (разность давлений),  $\text{Н/м}^2$ ;  
 $d$  — диаметр, мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов Б.С., Генин А.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974. 408 с.
2. Мильман О.О. Теплообмен при естественной циркуляции внутри обогреваемых труб // Теплообмен: Тр. 1-й Рос. нац. конф. М., 1994. Т. 2 С. 147—150.
3. Исаченко В.П., В.А. Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. — 4-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.