

ТЕПЛОТЕХНИКА

Член-корреспондент АН СССР М. А. СТЫРИКОВИЧ и М. Е. ШИЦМАН

**НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ РЕЖИМУ  
КИПЯТИЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ**

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования позволяют сейчас производить расчеты циркуляции воды в мощных паровых котлах. Однако наряду с этим до настоящего времени не имеется достаточно четких представлений о критериях надежности циркуляции. Существующие критерии надежности, базирующиеся, главным образом, на результатах анализа циркуляционных аварий действующих котлов среднего и высокого давления, количественно не увязывают параметры циркуляции, тепловую нагрузку и давление с температурным режимом кипящих труб.

Практические рекомендации <sup>(1)</sup> по оценке температурных условий работы вертикальных кипящих труб паровых котлов высокого и сверхвысокого давления (при отсутствии накипи) предполагают наличие либо очень хорошего охлаждения трубы паро-водяной смесью, либо сильного перегрева стенки трубы. Принято считать, что такой перегрев имеет место только при грубых нарушениях циркуляции — появлении застоя воды, свободного уровня, опрокидывания циркуляции или полного испарения всей поступающей в трубу воды. Все режимы движения воды вверх при сколь-нибудь значительной скорости циркуляции и паросодержании на выходе из трубы, заметно меньшей единицы, признаются допустимыми. Средние расчетные кратности циркуляции принимаются значительно большими лишь из-за возможности неодинаковых условий работы отдельных труб.

Существенно новым в изложенных ниже основных результатах экспериментального исследования является: 1) обнаружение значительной области ухудшенных температурных режимов стенки вертикальной кипящей трубы при паросодержаниях меньше единицы и удельных тепловых потоках менее  $700\,000$  ккал/м<sup>2</sup>·час; 2) установление характера изменения величины допустимого весового паросодержания в зависимости от значений давления, приведенных весовых скоростей пара и удельных тепловых потоков.

Исследование температурного режима и области безопасных режимов работы вертикальной кипящей трубы диаметром 30 мм проведено на полупромышленном контуре с естественной циркуляцией (описание контура дано в работе <sup>(2)</sup>) в следующих границах изменения параметров: по давлению 182—209 кг/см<sup>2</sup>, по удельным тепловым потокам  $(230—720) \cdot 10^3$  ккал/м<sup>2</sup>·час, по скорости циркуляции 0,2—2,2 м/сек, по приведенным весовым скоростям пара 60—400 кг/м<sup>2</sup>·сек, по весовым расходным паросодержаниям 8—100%.

Экспериментальным участком служил короткий ( $L = 200$  мм) толстостенный ( $D = 120$  мм,  $d = 30$  мм) отрезок трубы, заключенный в радиационную электропечь с силитовыми стержнями и установленный на вер-

тикальной необогреваемой трубе циркуляционного контура (см. рис. 1). Применение метода толстостенной трубы преследовало цель: на основе известных соотношений для передачи тепла через толстую цилиндрическую стенку получить на внутренней поверхности трубы тепловые потоки большой плотности при умеренных удельных тепловых потоках на наружной поверхности толстостенного участка.

Вследствие относительно малой высоты участка ( $L/d = 6,7$ ) существенное значение приобретает оценка величины торцевых растечек тепла по подводящим трубам и оценка влияния последней на распределение теплового потока по длине участка.

После получения результатов, излагаемых в настоящей статье, на толстостенном участке трубы были сделаны кольцевая проточка и зазоры на концевых отрезках трубы с целью снижения величины продольной и концевых растечек тепла (см. рис. 1).

Сопоставление результатов опытов, полученных на толстостенном участке без проточек и с таковыми, хорошо между собой согласуются и указывают на правильность выбора величин расчетных поправок.

Среднее значение теплового потока, воспринятого паро-водяной смесью при прохождении последней через экспериментальный участок, определялось как разность подведенного тепла, подсчитанного по показаниям электроприборов, и потери тепла через изоляцию печи в окружающую среду. Зависимость величины поте-

ри тепла от показаний термопар, заложенных на изоляции, определялась путем предварительной градуировки на холодной воде смонтированного участка с электропечью.

Величина теплового потока экспериментального участка контролировалась вторым независимым методом: по значению теплопроводности металла и разности температур термопар, заложенных в толщу металла вдоль продольной оси на глубину около 43 мм от торцов.

Усредненные значения локальных тепловых потоков, полученные по показаниям термопар толстостенной трубы, удовлетворительно согласуют-

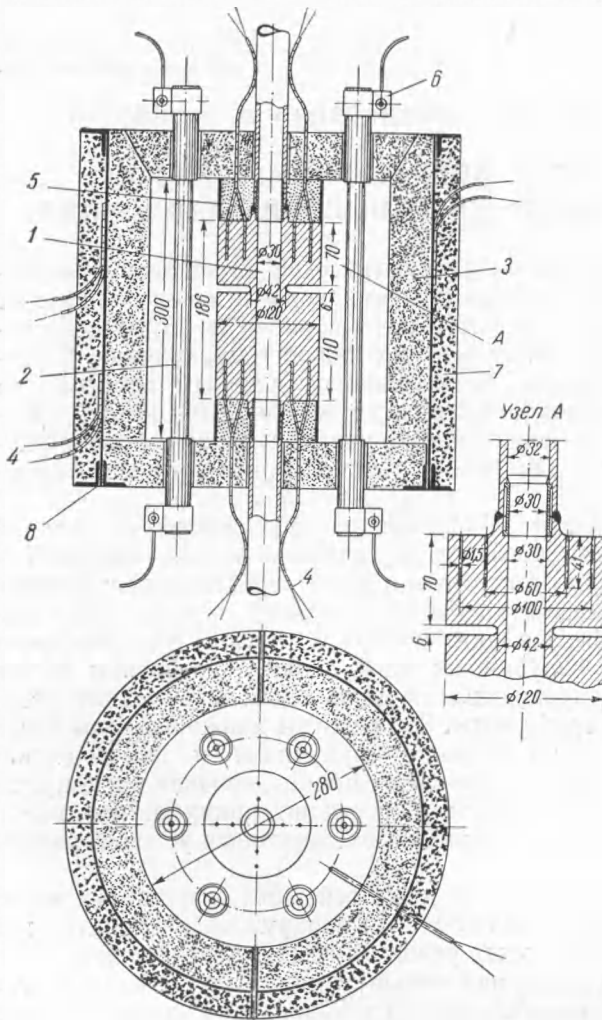


Рис. 1. Экспериментальный участок с радиационной электропечью. 1 — толстостенный участок печи, 2 — греющий селитовый стержень, 3 — керамика печи, 4 — термопара, 5 — защитное кольцо, 6 — токоподводящий наконечник, 7 — изоляция, 8 — съемный кожух

ся со значениями тепловых потоков, подсчитанных по балансу термодинамики кожуха печи.

На рис. 2 представлена типичная зависимость температуры стенки трубы от весовых скоростей циркуляции и пара, полученная при давлении  $p = 182 \text{ кг/см}^2$  и среднем значении удельного теплового потока  $q = 460\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}^*$ . Из рассмотрения рис. 2 следует, что в некоторых границах изменения скоростей циркуляции, соответствующих определенным значениям весовых скоростей пара, температуры стенки практически не изменяются и по величине превышают соответствующие температуры насыщения не более чем на  $15\text{--}20^\circ$ . Коэффициенты теплоотдачи в этих режимах по усредненным данным составляют около  $50\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{Ц}$ . При указанных условиях температурный режим кипящей трубы нормальный.

Снижение величины скорости циркуляции за пределы критических значений приводит к повышению температуры стенки, т. е. к нарушению нормального температурного режима. Характер нарушения температурного режима меняется в зависимости от величины параметров циркуляции — скорости циркуляции и весовой скорости пара.

При весовых скоростях пара более  $300 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$  температуры стенки трубы по мере снижения величины скорости циркуляции в сравнительно широких пределах за критическими значениями возрастают постепенно. При достижении  $100\%$  паросодержания экспериментальные величины температур стенки трубы близки к расчетным значениям, полученным по формуле для сухого насыщенного пара (граничная кривая  $a$  на рис. 2).

При весовых скоростях пара менее  $200 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$  после снижения величины скорости циркуляции за критические значения, значительное возрастание температуры стенки происходит в весьма узком диапазоне изменения скорости циркуляции.

Результатирующая обработка в виде зависимости критического паросодержания  $x_{кр}$ , выше которого лежит область ухудшенных режимов, от давления при постоянном значении весовой скорости пара  $w_{г'} = 140 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$  и постоянных значениях удельного критического теплового потока показывает (см. рис. 3), что область ухудшенных температурных режимов с ростом давления расширяется. Так например, при  $p = 180 \text{ кг/см}^2$  и  $q = 400\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$  область ухудшенных режимов лежит при весовом паросодержании более  $55\%$ . Соответственно, при

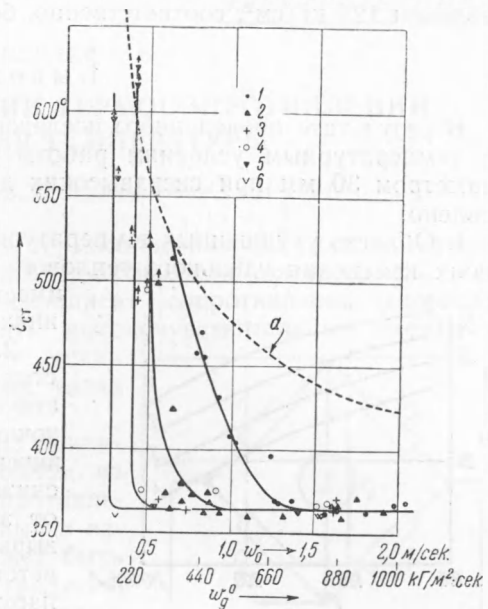


Рис. 2. Температура стенки трубы  $t_{ст}$  в зависимости от скорости циркуляции  $w_0$  или весовой скорости воды  $w_0^0$  и приведенной весовой скорости пара  $w_{г'}$  при давлении  $182 \text{ кг/см}^2$  и  $q = 460\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ . 1 —  $w_{г'} = 410\text{--}306 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ ; 2 —  $256\text{--}210 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ ; 3 —  $200\text{--}148 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ ; 4 —  $137\text{--}126 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ ; 5 —  $108\text{--}90 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ ; 6 —  $84\text{--}63 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$  (точки со стрелками получены при неустойчивой температуре). Кривая  $a$  —  $x = 1$ ,  $q = 460\,000$

\* Аналогичные зависимости были получены при  $p = 200$  и  $209 \text{ кг/см}^2$ ,  $q = 260\,000$ ;  $600\,000$  и  $700\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ .

давлении  $210 \text{ кг/см}^2$  область ухудшенных температурных режимов имеет место уже при весовых паросодержаниях более 30%. Проведенные в последнее время в лаборатории внутрикотловых процессов ЭНИН АН СССР (Л. Е. Факторович) аналогичные исследования при более низких давлениях показали, что при вышеуказанных значениях  $w_g'' = 140 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$  и  $q = 400\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$  ухудшенные режимы при давлении  $150 \text{ кг/см}^2$  имеют место при значениях весового паросодержания более 78%, а при давлении  $125 \text{ кг/см}^2$ , соответственно, более 90%.

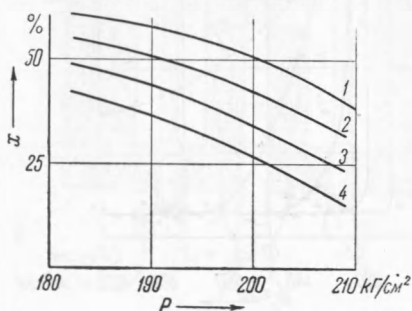
## В ы в о д ы

В результате проведенного исследования границ безопасных режимов по температурным условиям работы вертикальной кипятильной трубы диаметром 30 мм при сверхвысоких давлениях ( $182\text{--}209 \text{ кг/см}^2$ ) установлено:

1. Область ухудшенных температурных режимов в исследованных границах изменения удельного теплового потока и параметров циркуляции имеет место при весовых паросодержаниях значительно меньше единицы.

2. При приведенных весовых скоростях пара более  $300 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$  существует значительная область промежуточных режимов, характерных при увеличении паросодержания постепенным снижением интенсивности теплоотдачи от значений, имеющих место при пузырьковом кипении, до значений, соответствующих сухому насыщенному пару.

Рис. 3. Зависимость величины критического весового паросодержания  $x_{кр}$  от давления и удельного критического теплового потока при приведенной весовой скорости пара  $w_g'' = 140 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ . 1 —  $q = 300\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ ; 2 —  $400\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ ; 3 —  $500\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ ; 4 —  $600\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$



3. Трактовка понятия «нарушение нормальной циркуляции» только как появления застоя или опрокидывания циркуляции уже не отвечает особенностям внутрикотловых процессов при переходе на сверхвысокие давления. При значениях удельного теплового потока  $(400\text{--}450) \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$  снижение скорости циркуляции до  $0,4\text{--}0,5 \text{ м/сек}$  при сохранении весовой скорости пара порядка  $100\text{--}150 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ , т. е. снижение кратности циркуляции до 2—2,5 является уже серьезным нарушением нормальной циркуляции, которое может привести к нежелательным последствиям.

Поступило  
4 II 1954

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Нормы расчета циркуляции воды в паровых котлах, 1950. <sup>2</sup> М. А. Стырикович, З. Л. Миропольский, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1951).