

Член-корреспондент АН СССР М. А. СТЫРИКОВИЧ и З. Л. МИРОПОЛЬСКИЙ

### РАССЛОЕНИЕ ПОТОКА ПАРОВОДОЯНОЙ СМЕСИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОБОГРЕВАЕМОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Рядом работ (1,2) установлено, что при движении газо-жидкостных смесей в горизонтальных трубах имеет место неравномерное распределение фаз по высоте сечения. При малых скоростях потока наблюдалось чисто расслоенное течение, когда влажосодержание потока в верхней части трубы близко к нулю. В значительно более широкой области скоростей имело место лишь периодическое омывание верхней образующей трубы. Исследования, проведенные с пароводяными смесями при атмосферном давлении (4), показали, что в этом случае режимы течения близки к наблюдаемым для воздухо-водяных смесей, причем в случае обогрева трубы наблюдалось в зоне стабильного расслоения устойчивое повышение температуры стенки в верхней части сечения, а при периодическом омывании верхней образующей водой здесь возникали периодические колебания температуры.

Опыты, проведенные при повышенных давлениях (от 11 до 90 ата) с трубой диаметром 56/70 мм (3), также обнаружили повышение температуры верхней образующей, однако во всей исследованной области здесь не наблюдалось периодических колебаний температуры и при увеличении скорости циркуляции устойчиво расслоенный режим течения непосредственно сменялся режимом с равномерным распределением температур стенки по всему периметру трубы. В итоге этого исследования было предложено считать, что при скоростях циркуляции больше 0,4 м/сек. расслоение прекращается при любых паросодержаниях. Влияние тепловой нагрузки на процесс возникновения и прекращения расслоения во всех этих опытах не было установлено.

В паровых котлах, имеющих горизонтальные или слабо наклоненные участки кипяtilьных труб, расслоение пароводяной смеси, сопровождающееся повышением температуры в верхней части трубы, приводит к понижению прочности металла, значительным температурным напряжениям, отложению солей на поверхности нагрева (так называемое «прятанье солей»), усиленной коррозии металла и другим явлениям, вызывающим нередко перебои в работе и аварии. Особенно часто такие аварии имели место на мощных котлах повышенного и высокого давления. Поэтому установление условий возникновения и прекращения расслоения в горизонтальных кипяtilьных трубах является практически весьма важным, в особенности при высоких давлениях. С этой целью были проведены опыты на экспериментальном стенде Энергетического института АН СССР.

Установка представляет собой замкнутый циркуляционный контур, состоящий из вертикального и горизонтального обогреваемых участков, вертикального необогреваемого участка, сепаратора и опускной трубы. Исследуемая горизонтальная труба была изготовлена из хромо-молибденовой стали и имела длину 8,2 м и диаметр 56/70 мм. Обогрев трубы производился дымовыми газами, полученными при сгорании мазута в вертикальной или выносной горизонтальной топках. Тепловые нагрузки в начале, середине и конце горизонтального участка опре-

делялись с помощью 3 калориметров. Температуры стенки исследуемой трубы измерялись с помощью 33 термопар (22 платино-платинородиевых и 11 хромель-алюмелевых), установленных в 9 сечениях, в различных точках внешнего периметра трубы. Горячие спаи 24 термопар были зачеканены близ наружной поверхности трубы, а 9 заложены в сверлениях в стенке на различной глубине. При проведении опытов считалось, что расслоение отсутствует, если перегрев верхней образующей в каком-либо сечении трубы и во всех последующих сечениях становился меньше  $5^\circ$  при  $q < 50\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час или меньше  $10^\circ$  при  $q \geq 50\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час.

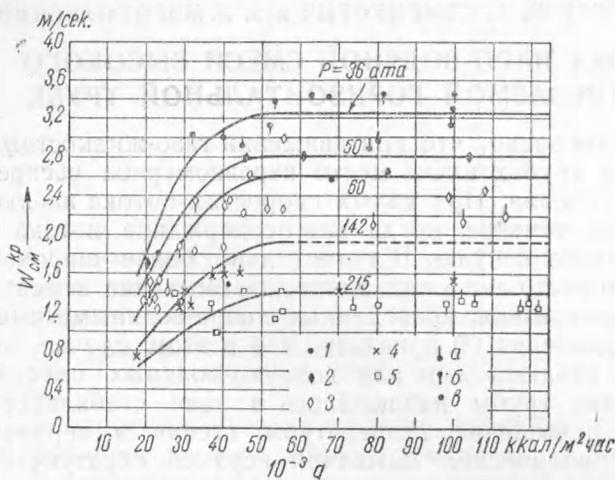


Рис. 1. Критическая скорость смеси в зависимости от тепловой нагрузки и давления. *a* — есть расслоение. *б* — нет расслоения, *в* — критическая точка. 1 —  $p = 36$  ата, 2—50, 3—60, 4—142, 5—215 ата

том средней тепловой нагрузки, измеренной калориметрами.

Опыты проводились при давлениях от 10 до 224 ата. В качестве основных ступеней давления были приняты следующие: 36, 60, 112, 142, 182 и 215 ата. Тепловая нагрузка, отнесенная к внутренней поверхности трубы, менялась от 20 до 120 тыс. ккал/м<sup>2</sup> час, скорость циркуляции от 0,25 до 1,0 м/сек., объемное расходное паросодержание от 0,2 до 0,9.

Всего было исследовано около 900 режимов работы обогреваемой горизонтальной трубы, где каждый режим представляет собой результат усреднения данных нескольких замеров, проведенных с интервалом в 5 мин. при устойчивых значениях исследуемых параметров. В итоге было установлено, что, как и в опытах К. Ф. Роддатиса (3), периодические температурные колебания отсутствовали, но стабильный перегрев верхней образующей имел место вплоть до скорости циркуляции  $w_0 = 1,0$  м/сек., если паросодержания были достаточно низкими. В области скоростей циркуляции от 0,25 до 1,0 м/сек. определяющей величины оказалась средняя расходная скорость смеси; ниже определенной величины ее расслоение имело место независимо от величины паросодержания и скорости циркуляции.

Величина этой критической скорости смеси оказалась зависящей от тепловой нагрузки, увеличиваясь с ростом  $q$  до 50 000 ккал/м<sup>2</sup> час. При дальнейшем росте  $q$  от 50 000 до 120 000 ккал/м<sup>2</sup> час заметного роста  $w_{кр}^{ср}$  не обнаружено (см. рис. 1). При равных тепловых нагрузках критическая скорость смеси убывает с давлением (см. рис. 2).

На рис. 3 представлена зависимость перегрева верхней образующей трубы по сравнению с нижней  $\Delta t = t_{ср}^{верх} - t_{ср}^{низ}$  при расслоении от скорости смеси и тепловой нагрузки для давления 112 ата. Перегрев

Для измерения скорости циркуляции применялась труба Вентури, установленная на опускной линии контура. Там же был установлен дроссель для регулирования скорости циркуляции. Приведенная скорость пара на выходе из обогреваемого участка определялась по тепловому балансу конденсатора; в других сечениях исследуемой трубы вычислялась с уче-

верхней образующей трубы в области расслоения увеличивается с ростом интенсивности обогрева и в исследованной области объемных паросодержаний  $\beta$  и приведенных скоростей жидкости  $w_0'$  при постоянном давлении однозначно определяется скоростью смеси, снижаясь с ее ростом.

При наличии значительной разности температур по периметру трубы тепло, подводимое к верхней ее части, частично отводится к менее нагретой — нижней части периметра за счет теплопроводности металла (так называемая растечка тепла), остальная часть тепла может быть передана пару, омывающему верхнюю часть трубы, или расходоваться на испарение капелек воды, выпадающих на стенку из парового потока.

На рис. 4 показан перегрев верхней образующей, подсчитанный в предположении отвода тепла только за счет растечки и в случае передачи тепла также к сухому насыщенному пару. На этом же графике показана экспериментальная кривая, левая часть которой соединена плавной линией с точкой начала закипания, где  $\Delta t$  должно быть равно нулю. Как видно из графика, в области скоростей смеси, близких к  $w_{см}^{кр}$

опытные точки дают весьма малые значения перегрева верхней образующей, что может быть объяснено лишь попаданием воды на верхнюю часть периметра трубы. При этом, поскольку во всех наших опытах не было обнаружено колебаний температуры, это увлажнение следует рассматривать не как периодическое захлестывание верха трубы гребнями волн, наблюдавшееся при низких давлениях (1, 2, 4), а как непрерывное орошение поверхности каплями воды, уносимыми паром с поверхностного раздела фаз и выпадающими из потока пара. С другой стороны, так как при  $w_{см} \ll w_{см}^{кр}$  замеренные  $\Delta t$  при высоких давлениях заметно выше расчетных, то следует полагать, что при расслоении пар является перегретым. Это подтверждается также показаниями термомпар, установленных на верхней и нижней образующей трубы в сечении, расположенном за обогреваемым участком.

Из рассмотрения кривых, проведенных на рис. 4 сплошными линиями, следует, что при  $q = \text{const}$  и  $w_0' = \text{const}$  перегрев верхней образующей начинается вскоре после начала закипания, т. е. при  $w_{см} \approx w_0'$ ; с увеличением скорости смеси  $\Delta t$  быстро растет, достигает максимального значения, а затем убывает, становясь равным нулю при  $w_{см} = w_{см}^{кр}$ . С уменьшением приведенной скорости жидкости увеличиваются максимальные значения  $\Delta t$ , а также и область скоростей смеси, при которых существует расслоение. При прочих равных условиях  $\Delta t$  уменьшается с ростом давления.

При замерах на промышленных прямоточных котлах (4) наблюдались сильные колебания температур верхней образующей трубы, которые в отдельных случаях носили периодический характер. Однако эти котлы работают со значительными колебаниями расхода по виткам, зачастую носящими ясно выраженный периодический характер.

Результаты наших опытов дают возможность утверждать, что при постоянной скорости смеси периодические пульсации температур в области расслоения при повышенных давлениях не имеют места. По-

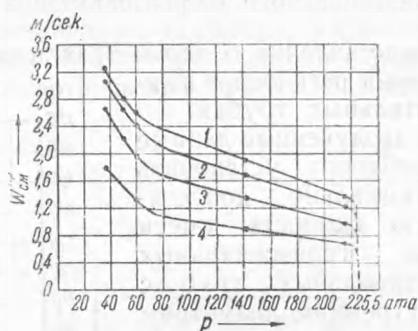


Рис. 2 Критическая скорость смеси в зависимости от давления и тепловой нагрузки. 1 —  $10^{-3}q \geq 50$ , 2 —  $10^{-3}q = 40$ , 3 —  $10^{-3}q = 30$ , 4 —  $10^{-3}q = 20$  ккал / м<sup>2</sup> час

этому температурные пульсации, замеренные на прямоточных котлах (4) и объяснявшиеся, по аналогии с картиной, наблюдавшейся при атмосферном давлении, прохождением водяных перемычек между длинными паровыми пробками, следует объяснять лишь пульсациями расхода, которые всегда имеют место у подобных котлов. Из рис. 3 и 4 видно, что амплитуда колебаний температуры будет тем больше, чем больше амплитуда колебаний скорости смеси. Наиболее резкие температурные пульсации должны возникать при скоростях смеси, близких к  $w'_0$  или  $w_{см}^{кр}$

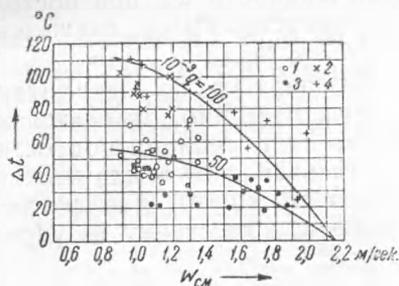


Рис. 3. Перегрев верхней образующей трубы при  $p = 112$  ата.  $w'_0 = 0,4 - 0,6$  м/сек,  $q \cdot 10^{-3} = 50$  (1),  $q \cdot 10^{-3} = 100$  (2),  $w'_0 = 0,6 - 0,9$  м/сек,  $q \cdot 10^{-3} = 50$  (3),  $q \cdot 10^{-3} = 100$  (4)

представления о параметрах циркуляции, достаточных для предотвращения расслоения в кипящих трубах.

Полученные данные позволяют установить минимально допустимую скорость смеси для горизонтальных кипящих труб с внутренним диаметром 56 мм или близким к нему, в зависимости от рабочего давления котла и интенсивности обогрева данного участка трубы. Эти данные охватывают всю область значений параметров циркуляции, практически имеющих место в котлах с естественной циркуляцией, и значительную часть режимов, характерных для прямоточных котлов. Впервые исследована область давлений свыше 90 ата, имеющая особое значение для установок высокого ( $\sim 110$  ата) и сверхвысокого ( $\sim 180-190$  ата) давления.

Результаты настоящей работы заставляют внести серьезные изменения в существовавшие до сего времени представления о параметрах циркуляции, достаточных для предотвращения расслоения в кипящих трубах.

Результаты настоящей работы заставляют внести серьезные изменения в существовавшие до сего времени представления о параметрах циркуляции, достаточных для предотвращения расслоения в кипящих трубах.

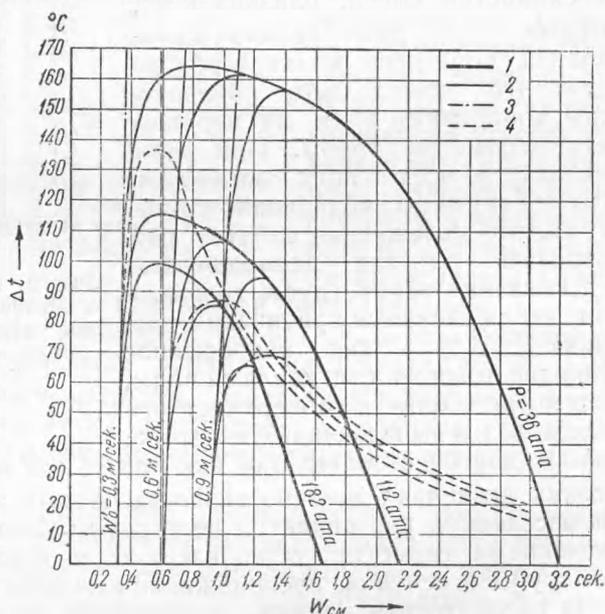


Рис. 4. Перегрев верхней образующей трубы в зависимости от скорости смеси, приведенной скорости жидкости и давления при  $q = 100 \cdot 10^3$  ккал/м<sup>2</sup> час. 1 — экспериментальная кривая, 2 — интерполяция, 3 — расчетная кривая без учета теплоотдачи к пару при  $p = 112$  ата, 4 — то же с учетом теплоотдачи к сухому насыщенному пару

Энергетический институт  
им. Г. М. Кржижановского  
Академии наук СССР

Поступило  
21 XII 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. И. Костерин, Изв. АН СССР, ОТН, № 7 (1943). <sup>2</sup> А. А. Арманд, Изв. ВТИ, № 1 (1946). <sup>3</sup> К. Ф. Роддатис, там же, № 3 (1946). <sup>4</sup> В. Ф. Ладицкий и Д. Ф. Петерсон, Циркуляция в паровых котлах, 1948.