

С. М. ЛУКОМСКИЙ

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

(Представлено академиком А. В. Винтером 9 VII 1951)

Переход от ядерного или пузырьчатого кипения к пленочному ( $q_{\text{макс}}$ ) изучался при кипении в условиях естественной конвекции (1, 2) и в трубах (3-5). Однако до последнего времени исследования при кипении жидкости в трубах производились с легкокипящими веществами под высоким давлением и с водой — при атмосферном и сверхвысоком давлении.

Провести исследование возникновения максимального теплового потока ( $q_{\text{макс}}$ ) в трубах в широком диапазоне давлений для воды из-за ряда методических и технических трудностей до настоящей работы не удавалось. Вместе с тем, вода является наиболее распространенным в технике рабочим телом; это побудило нас попытаться преодолеть вышеупомянутые трудности.

В примененном нами экспериментальном нагревателе 1 (рис. 1) внутренняя нагревательная поверхность трубы заменена четырьмя вертикально расположенными электронагревательными пластинками ( $40 \times 5 \times 1$  мм), выполненными из нержавеющей стали и расположенными по внутренней образующей трубы с зазором в 2—4 мм. На нагревательные пластинки подается переменный электрический ток через понижающий трансформатор 220/15.

Нагревательные пластинки вставляются в кожух, выполненный из талькохлорида, причем для предотвращения возможной передачи тепла к рабочей жидкости от боковых поверхностей нагревательного элемента последний вводится в пазы, выполненные в виде ласточкиного хвоста (разрез А—А, рис. 1).

Электрические вводы в виде медных колец одновременно служат и прокладками между фланцами. Для обеспечения электроизоляции между медными кольцами и фланцами установки проложены клингеритовые и слюдяные прокладки (толщиной  $\sim 0,08$  мм), обеспечивающие одновременно плотность установки до давлений 220 ата.

Экспериментальный электронагреватель в собранном виде вставляется между фланцами в подъемную трубу экспериментального контура (рис. 1). Внутренний диаметр экспериментального электронагревателя равен 18—19 мм, а переход на диаметр 25 мм подъемной трубы контура выполнен при помощи переходных конусов, установленных как перед нагревателем, так и после него.

В принятой конструкции не весь периметр трубы является нагревающим. В связи с последним, условия работы, выполненной по этому методу и предназначенной имитировать трубу нагревательной поверхности, на первый взгляд существенно отличаются от условий работы, имеющих место в действительности в трубах, обогреваемых по всему рабочему периметру.

Останавливаясь на таком методе исследования, мы учитывали экспериментальные данные по кипению в большом объеме, из которых следует, что изменение размеров греющей поверхности существенно не сказывается на результатах опытов по определению  $q_{\text{макс}}$ .

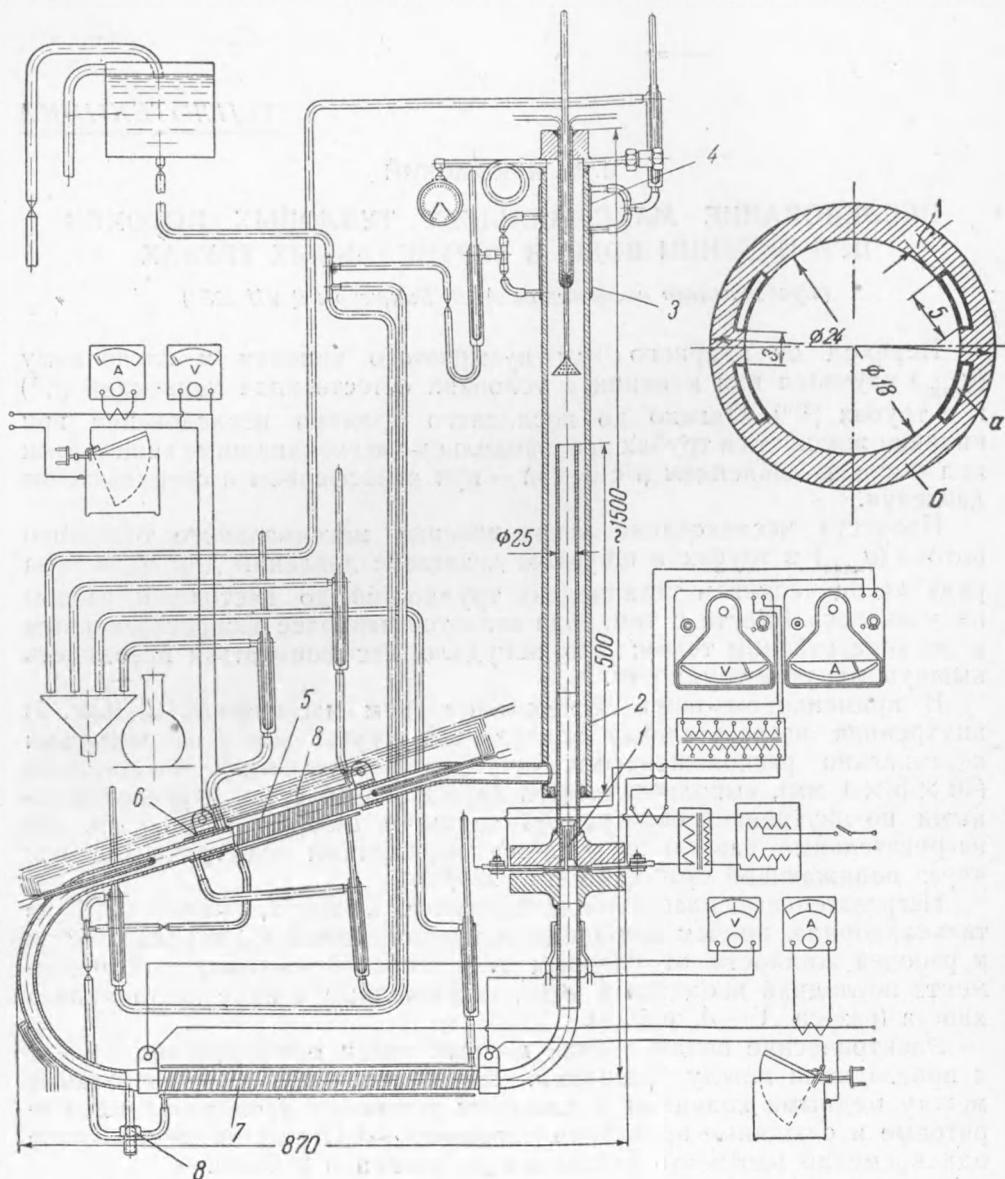


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — экспериментальный нагреватель, 2 — сепаратор, 3 — 4 — холодильники-конденсаторы, 5 — вспомогательный электронагреватель-калориметр, 6 — водяной калориметр, 7 — вспомогательный электронагреватель для подготовки паро-жидкостной смеси, 8 — водяное охлаждение нагревателя для учета потерь тепла; а — электронагревательные пластины, б — талькохлоридовый кожух

Для подтверждения этого положения применительно к кипению в трубах был произведен ряд опытов в трубах  $d = 10, 20$  и  $32$  мм. Число и длина расположенных по периметру трубы греющих электронагревательных пластинок варьировались: по периметру трубы монтировались 1, 2, 6 и 14 пластинок длиной 30, 60, 120 и 300 мм.

Таблица 1

	Диаметр трубы в мм						
	10		20		32		
Число пластинок . . . . .	1	1	1	2	2	6	14
Длина пластинок в мм . . . . .	60	120	300	30	300	120	120
$q_{\text{макс}}$ в ккал/м <sup>2</sup> час							
для воды . . . . .	1 600 000	1 520 000	1 600 000	—	—	1 520 000	1 520 000
для этилового спирта . . . . .	—	—	445 000	455 000	465 000	—	—
для бензола . . . . .	—	—	424 000	—	425 000	—	—

Как видно из табл. 1, где приведены результаты этих опытов, не было замечено существенных расхождений в величинах  $q_{\text{макс}}$  при разном числе пластинок по периметру трубы и разной их длине. В связи с вышеизложенным, принятая методика получения максимальных тепловых потоков в трубах представляется нам достаточно надежной.

Возникновение максимальных тепловых потоков фиксировалось по показаниям электрических приборов, предшествующих перегоранию нагревателя. Максимальная ошибка в определении  $q_{\text{макс}}$  оценивается в  $\pm 5-10\%$ . Однотипность электронагревателей, применявшихся в опытах, проверялась при атмосферном давлении по значению  $q_{\text{макс}}$  в большом объеме.

Принятая методика в целом была проверена на атмосферном давлении, после чего было проведено исследование по определению максимальных тепловых потоков для воды в трубах в диапазоне давлений от 1 до 220 ата\*. Опыты производились в следующих пределах давлений: 1 ÷ 3, 5, 10, 10 ÷ 25, 40, 50, 60, 125 ÷ 180, 190 ÷ 200, 210, 220 и 223 ата.

Скорость циркуляции изменялась от 1,8 до 0,04 м/сек, тепловые нагрузки от 1 200 000 до 3 800 000 ккал/м<sup>2</sup> час. Пределы изменения объемного расходного паросодержания и весового расходного паросодержания в зависимости от давления и скорости циркуляции приведены в табл. 2.

Таблица 2

	Давление в ата				
	до 25		25—65		> 100
Скорость циркуляции в м/сек. . . . .	0,4—1,8	0,04	0,5—1,6	0,02—0,04	0,5—0,6
Объемное паросодержание в % . . . . .	22—76	39—90	17—33	91—93	4—7
Весовое паросодержание в % . . . . .	0,35—2	0,85—12	0,3—1,2	45—60	0,6—1,88

Результаты опытов нанесены на рис. 2. Как видно,  $q_{\text{макс}}$  быстро возрастает с увеличением давления от 1 ата до 20 ÷ 30 ата соответственно от величины  $\sim 1\,500\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час до  $\sim 3\,500\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час. От  $\sim 30$  до 90 эта величина максимального теплового потока мало

\* Исследование проведено в Энергетическом институте им. Г. М. Кржижановского Академии наук СССР.

изменяется от давления. Дальнейшее увеличение давления свыше 90 ата приводит к постепенному снижению  $q_{\text{макс}}$  с  $\sim 3\,400\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час до  $\sim 1\,600\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час при 200 ата.

Повышение давления выше 200 ата приводит к резкому снижению максимального теплового потока до  $\sim 600\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час при 223 ата. Отклонение экспериментальных точек от проведенной кривой не превышает  $\pm 5-10\%$ . Для сравнения на том же рисунке приведена экспериментальная кривая зависимости  $q_{\text{макс}}$  от давления при кипении воды

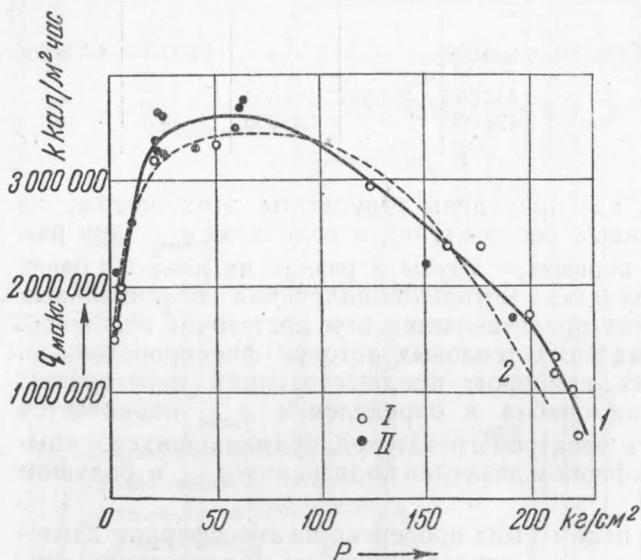


Рис. 2. Зависимость максимального теплового потока от давления при кипении воды в трубе диаметром 18—19 мм и в большом объеме. I — в трубе (данные автора); I — первая серия опытов, II — вторая серия опытов; 2 — в большом объеме (данные Е. А. Казаковой, ЭНИН)

этих величин в настоящем исследовании не отразилось сколь-нибудь существенно на величине  $q_{\text{макс}}$ . Настоящее полностью подтверждает высказанные нами ранее <sup>(5)</sup> предположения о малом влиянии на  $q_{\text{макс}}$  скорости и паросодержания в определенных пределах изменения этих величин. Уместно заметить, что вышеуказанное не следует распространять на более широкие пределы изменения паросодержаний, так как при этом могут иметь место другие закономерности.

Интересно отметить, что при атмосферном давлении, как в наших опытах, так и в опытах Е. А. Казаковой, получена величина  $q_{\text{макс}} \cong 1\,500\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час, что находится в согласии с опубликованными нами ранее данными <sup>(5)</sup>, а также с более поздними исследованиями М. А. Стыриковича и Г. М. Полякова <sup>(6)</sup>.

Пользуюсь случаем принести свою благодарность С. М. Модорской и Л. С. Штоколову за участие в проведении данной работы.

Поступило  
1 VI 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. С. Кутателадзе, Теплоотдача при конденсации и кипении, 1949.  
<sup>2</sup> Е. А. Казакова, ДАН, 71, № 1 (1950). <sup>3</sup> С. М. Лукомский, Химическая промышленность, № 6 (1944). <sup>4</sup> С. М. Лукомский, Изв. АН СССР, ОТН, № 8 (1947). <sup>5</sup> С. М. Лукомский, ДАН, 68, № 6 (1949). <sup>6</sup> М. А. Стырикович и Г. М. Поляков, Изв. АН СССР, ОТН, № 5 (1951).

на нихромовой пластинке в большом объеме по экспериментальным данным Е. А. Казаковой. Расхождение результатов не превышает возможной ошибки экспериментов. Закономерное отклонение данных по трубам по сравнению с данными в большом объеме имеет место только при весьма высоких давлениях. По всей видимости, в этой области сказывается влияние скорости <sup>(5)</sup>.

Из сопоставления экспериментальных данных также следует, что изменение паросодержания и скорости течения в пределах изменения