

Ш. Г. ДЖАНДЖГАВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ПАРА НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

(Представлено академиком М. В. Курпичевым 29 XI 1949)

Вопрос об образовании пузырьков пара при кипении жидкости теоретически разобран довольно детально (см., например, (1)). Известно, что если жидкость смачивает поверхность, т. е. если краевой угол смачивания  $\theta < 90^\circ$ , то пузырьки пара образуются на бугорках шероховатости поверхности нагрева, которые и являются центрами парообразования. Радиус кривизны бугорков, действующих в качестве центров парообразования при заданных условиях, определяется формулой:

$$r \geq \frac{2\sigma}{p' \Delta t},$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе жидкость — пар,  $\Delta t = t_w - t_s$  — температурный напор и  $p' = (dp/dt)_s$ .

При атмосферном давлении и температурном напоре  $\Delta t = 5 \div 7^\circ$ , соответствующем нагрузке  $5000 \div 10000$  ккал/м<sup>2</sup> час, когда при испарении воды начинается образование пузырьков пара на поверхности нагрева, по приведенной формуле  $r = 6,7 \div 4,8 \mu$ . Таким образом, при указанных условиях начальный диаметр пузырьков водяного пара, образующихся на выступах шероховатости, должен быть равен приблизительно  $10 \mu$ .

В выемках же размером порядка  $r$  на поверхности пузырьки расти не могут по той причине, что вследствие капиллярного давления граница раздела между образующейся в выемке паровой фазой и жидкостью (при краевом угле смачивания  $\theta < 90^\circ$ ) не может выйти за пределы плоскости.

Экспериментально образование пузырьков пара на поверхности, насколько нам известно, до сих пор не исследовалось. Наши опыты\* проводились с помощью визуальных наблюдений через микроскоп и фотографирования пузырьков водяного пара, образующихся при атмосферном давлении на поверхности нагрева. Поверхностью нагрева в наших опытах служила цинковая проволока диаметром 3 мм, обогреваемая электрическим током. Проволока устанавливалась в горизонтальном положении в сосуде с стеклянными стенками, который заполнялся дважды дистиллированной водой. С целью дегазации вода предварительно кипятилась и переливалась в упомянутый сосуд при температуре, близкой к  $100^\circ$ .

Для наблюдений использовался биологический микроскоп типа М-9, к которому была приспособлена фотокамера от большого металлографического микроскопа с масштабной миллиметровой сеткой.

\* В проведении наших опытов принимали участие: Г. И. Гугунейшвили, Г. И. Амирханов, К. К. Цагарели и Л. Мурадян.

Объектив микроскопа устанавливался на один из центров парообразования. При тепловых нагрузках  $10\,000 \div 12\,000$  ккал/м<sup>2</sup> час, когда на указанной проволоке начинают появляться пузырьки пара, через микроскоп на масштабной сетке хорошо виден диаметр зарождающихся паровых пузырьков по величине порядка  $5 \div 10$   $\mu$ .

Производились также наблюдения за исчезновением пузырьков. С этой целью нагревающий проволоку электрический ток прерывался, благодаря чему сосуд с водой и проволокой охлаждался за счет потери тепла в окружающую среду.

При этом видимый в микроскоп пузырь пара диаметром  $700 \div 800$   $\mu$  начинал сравнительно медленно сокращаться и мгновенно исчезал лишь при диаметре, приблизительно равном  $5 \div 10$   $\mu$ .

Такой метод наблюдения удобнее первого, так как в этом случае пузырек пара все время находится в поле зрения, тогда как при нагревании при указанной низкой тепловой нагрузке пузырьки пара возникают крайне нерегулярно и неожиданно.

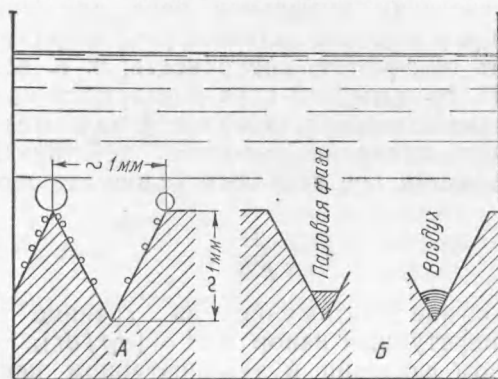


Рис. 1. А — к механизму парообразования на вершинах и стенках насечки; Б — к механизму образования паровой фазы в щели

Необходимо подчеркнуть, что при наблюдении за исчезновением пузырьков паровые пузырьки легко отличаются от воздушных: по мере охлаждения сосуда паровые пузырьки уменьшаются в объеме и исчезают неизмеримо более быстро, чем воздушные.

Кроме того, производились наблюдения за образованием пузырьков пара на поверхности, на которую острой бритвой наносились насечки глубиной приблизительно 1 мм и шириной основания тоже 1 мм (рис. 1). В этом случае пузырьки пара зарождаются и на боковых стенках насечки (рис. 1, А), затем перекатываются к вершине и сливаются с сидящим на вершине пузырем, благодаря чему последний увеличивается относительно очень быстро.

Интересно отметить, что, как показали наблюдения, паровая фаза зарождается также в щели между гранями насечки, т. е. у вершин насечки, но в этом месте объем паровой фазы не растет и все время остается в неизменном состоянии, с плоской границей раздела между паром и водой. В тех же случаях, когда в указанной щели по какой-либо причине выделяется воздух, граница раздела между воздухом и водой, по нашим визуальным наблюдениям, имеет небольшую выпуклость в сторону жидкости (рис. 1, Б).

При фотографировании пузырьков пара изображения микроскопа проектировались на экран фотокамеры и затем фиксировались аппаратом «ФЭД» (Лейка). Время засечки одного кадра фотоаппаратом

составляло 0,002 сек. Несколько десятков кадров, снятых таким образом, фиксировали пузырек во всех стадиях его развития от момента зарождения до увеличения в диаметре до  $700 \div 800 \mu$ , когда пузырек выходил из поля зрения объектива микроскопа.

Но, к сожалению, получить таким методом фотографирования яркие и убедительные фотографии результатов описанных наблюдений возникновения и исчезновения пузырьков не удалось. Достаточно хорошо фотографировались лишь более поздние стадии парообразования. Одна из таких фотографий представлена на рис. 2. Наибольший пузырек на этой фотографии имеет диаметр  $130 \mu$ . Зародившиеся пузырьки видны в виде бугорков в правой части фотографии.

Пузыри пара диаметром до  $600 \div 700 \mu$  имеют шарообразную форму и расположены почти касательно к поверхности, причем краевой угол смачивания  $\theta = 25 \div 30^\circ$ .

Под действием конвективных токов жидкости такие пузыри, как показали визуальные наблюдения, иногда перекатываются на поверхности, но не отрываются.

Отрываются пузыри значительно большего диаметра. Пузырек несколько вытягивается к моменту отрыва и краевой угол смачивания увеличивается до  $\theta = 40 \div 60^\circ$ , а иногда и более.

Зародившиеся и очень мелкие пузырьки пара имеют краевой угол смачивания  $\theta = 35 \div 40^\circ$ .

Таким образом, наши визуальные наблюдения показали, что краевой угол смачивания паровых пузырьков не является величиной постоянной, а меняется, начиная от их зарождения до отрыва, сперва уменьшаясь с ростом пузырьков, а затем увеличиваясь перед их отрывом.

Выяснить характер элемента поверхности, на котором возникает пузырек пара, в результате приведенных наблюдений нам не удалось по той причине, что возникает пузырек, как уже отмечалось, неожиданно и растет он затем очень быстро, вследствие чего визуально заметить, что центром парообразования является бугорок шероховатости, или лунка, или какая-либо другая деталь элемента поверхности, не представляется возможным.

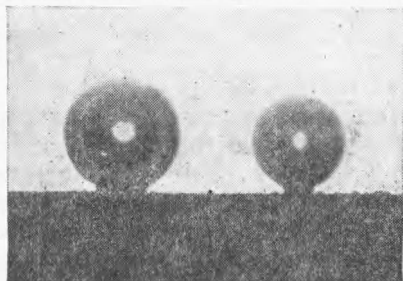


Рис. 2

Тбилисский институт  
инженеров железнодорожного транспорта  
им. В. И. Ленина

Поступило  
18 X 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> М. А. Михеев, Основы теплопередачи, 1949, стр. 126.