

УДК 536.25

Е.Н.Сайкова (4 курс, каф. КТиЭТ), Б.Ф.Балунов, д.т.н.

## МЕТАСТАБИЛЬНОСТЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ВОДЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.

Явление перегрева жидкости выше температуры её насыщения при рассматриваемом давлении (метастабильность жидкости) в основном исследовалось для двух его частных случаев:

- критическое истечение вскипающего потока;
- перегрев пузырька воды, помещённого в более высококипящую жидкость при наличии нагрева этой жидкости.

Однако, не известны исследования, посвящённые метастабильным процессам в турбулентном потоке воды  $Re \geq 10^4$ . Этим значениям числа Рейнольдса для труб большого диаметра ( $d \geq 0.1$  м) при  $t \approx 100^\circ\text{C}$  могут соответствовать весьма низкие скорости воды ( $w \approx 0.03$  м/с), что характерно для работы тяговых участков контуров естественной циркуляции системы пассивного отвода тепла от первого контура АЭС и для ряда иных установок. Поэтому исследование рассматриваемого явления в таких условиях представляет несомненный интерес.

Задачей выполненного исследования являлось:

- определение максимальных величин перегрева воды при её низких давлениях и скоростях;
- определение условий реализации этих перегревов.

Объектом исследования являлась верхняя часть тягового участка полновысотной (35м) модели циркуляционного контура системы охлаждения вакуумной камеры международного термоядерного реактора ИТЭР. Рассмотрен вариант схемы выполнения циркуляционного контура со вскипанием воды на подъёмном участке между вакуумной камерой и сепаратором (тяговый участок).

На основе предварительно проведённых экспериментов с рассматриваемой моделью было предположено запаздывание вскипания воды при падении её давления по высоте тягового участка и наличие определённого отрезка с перегретой водой.

Движущийся в контуре теплоноситель представлял собой конденсат от ТЭЦ ЦКТИ, прошедший предварительное дегазирование путём сброса паровоздушной смеси при разогреве модели. Также он непрерывно дегазировался при сепарации пара. Все элементы тягового участка выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Таким образом, обеспечивались условия, необходимые для существенного перегрева (отсутствие газовых и механических включений в жидкости и соответствие чистоты поверхности условиям работы реальных контуров).

По мере удаления вниз (вверх по потоку) от верхнего среза тягового участка гидродинамические возмущения ослабевают, и допускается большая степень растяжения не вскипающей воды (большой её перегрев). Однако, существует предельное значение перегрева воды ( $\delta t_{\text{пред}}$ ), которое определяется лишь физическими свойствами воды и степенью турбулизации её потока, которую можно характеризовать числами Вебера ( $We$ ) или Рейнольдса ( $Re$ ). Превышение значения  $\delta t_{\text{пред}}$  приводит не только к дальнейшему смещению вниз сечения срыва перегрева, но и к образованию нового «генератора возмущений», распространяющихся вверх по потоку. С такой же периодичностью ( $\Delta z = 0.5-0.9$  м), что и расстояние  $z \approx 0.63$  м от верхнего среза тягового участка до верхнего сечения

фиксации (первого) предельного перегрева, расположены и последующие вниз сечения фиксации последующих предельных перегревов воды.

При проведении экспериментов от опыта к опыту малыми ступенями увеличивалась мощность электронагревателей модели вакуумной камеры, что приводило к росту перегрева воды  $\delta t_{пер} \approx t_{вых}^{BK} - (t_n)_z$ , фиксируемого поочерёдно термомпарами, расположенными вдоль тягового участка. Так как постепенно увеличивали поток подводимого тепла, то сечение начала процесса парообразования постепенно смещалось вверх по потоку.

Превышение значения  $\delta t_{пер}$  приводит не только к дальнейшему смещению вниз сечения срыва перегрева, но и к образованию нового «генератора возмущений», распространяющихся вверх по потоку. Так термпара  $t_{11}$ , расположенная на расстоянии 0,63м от верхнего среза трубы, фиксировала более высокие значения  $\delta t_{пер}^{макс}$  не только по сравнению с термпарой  $t_{12}$ , расположенной на расстоянии 0,41м, но и по сравнению с термпарой  $t_{10}$ , расположенной на расстоянии 1,04м. Приведённое связывается с тем, что при таком удалении и достигаются предельные  $\delta t_{пред}$ , не зависящие от расположения «генератора возмущения» значения  $\delta t_{пер}^{макс}$ .

Отличительной особенностью настоящих экспериментов является стационарное существование рассматриваемого перегрева воды с его разрушением в фиксированном сечении по высоте тягового участка после достижения предельного значения перегрева воды ( $\delta t_{пред}$ ). Так, некоторые стационарные эксперименты продолжались 1-1.5 часа.

Все виды обработки были выполнены в виде безразмерных критериев при неизменном включении в значение функции величин  $\delta t_{пред}$ , а в значение её аргумента величины скорости потока. Один из видов обработки был выполнен в критериях Якоба  $Ja = f(We; \rho'/\rho'')$ ; где  $Ja = c_p \delta t_{пред} / r$ ;  $We = w \mu' / \sigma$ . Результаты обобщаются соотношением (линия 1 на рис.1):

$$Ja = 1.4 \cdot 10^{-7} \rho' / \rho'' / We^{0.5} \quad (1)$$

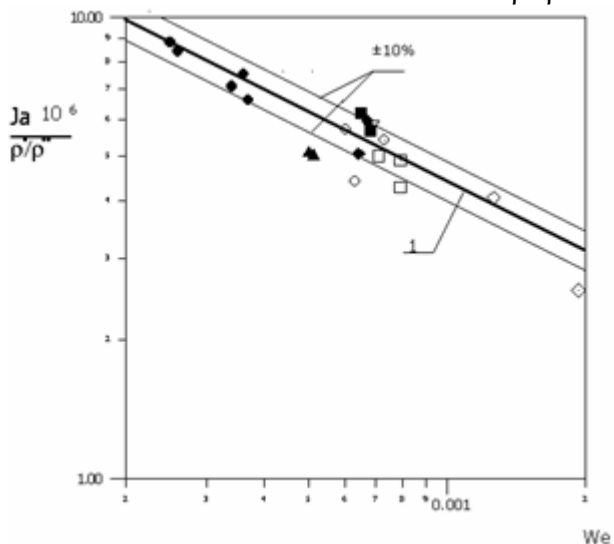


Рис. 1. Зависимость  $Ja(\rho'/\rho'') = f(We)$

В приведённую зависимость входят как параметры, определяющие работу образования зародышей паровой фазы ( $\delta t_{пред}$ ,  $\sigma$ ,  $\rho'/\rho''$ ), так и параметры, характеризующие степень возмущения потока ( $w$ ,  $\mu'$ ). На рис. 1 не прослеживается зависимость функции как от места расположения сечения фиксации величины  $\delta t_{пред}$  (номера термпары), так и возмущающего влияния циркуляционного насоса. Отсутствует расслоение результатов опытов, проведённых при естественной ( $\bullet$ ;  $\oplus$ ;  $\blacktriangle$ ;  $\blacksquare$ ;  $\blacklozenge$ ) и принудительной циркуляции ( $\diamond$ ;  $\square$ ;  $\nabla$ ) теплоносителя.

При определении значений максимального перегрева воды  $\delta t_{пер}^{макс}$

проведены эксперименты в следующем диапазоне режимных параметров:  $p_{сеп} = 32-165$  кПа (абс); скорость воды в тяговом участке  $w = G/\rho'F_{пр} = (5.3-42)10^{-2}$  м/с;  $Re = (9-72)10^3$ . В итоге максимальные значения перегрева воды в данных условиях составили  $\delta t_{пер}^{макс} = 1.2-10.8$  К.