

Разрешение прибора на  $Co^{60}$  составляло 11%. Линейность шкалы проверялась источниками  $Cs^{137}$ ,  $Co^{60}$  и  $Po - Be$ .

Относительный выход захватного  $\gamma$ -излучения оценивался по площади под пиком, линии  $7,64 \text{ Мэв}$ .

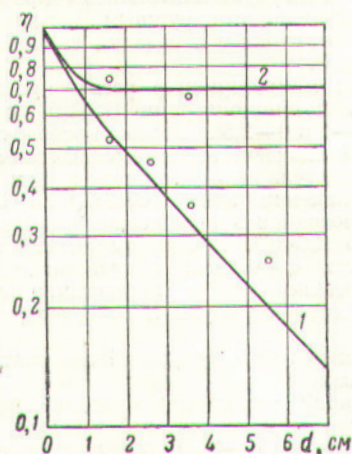


Рис. 6. Зависимость относительного снижения выхода  $\eta$  захватного  $\gamma$ -излучения с энергией  $7,64 \text{ Мэв}$  от толщины блокирующего экрана:

1, 2 — блокировка борированным свинцом и карбидом бора соответственно; — результаты расчета; ● — экспериментальные данные.

Спектры захватного  $\gamma$ -излучения, показанные на рис. 2, имеют две линии, соответствующие поглощению нейтронов ядрами водорода ( $2,23 \text{ Мэв}$ ) и железа ( $7,64 \text{ Мэв}$ ).

Кроме того, для рассматриваемых композиций на

электронно-вычислительной машине было рассчитано пространственно-энергетическое распределение потоков нейтронов в диффузионно-возрастном приближении по семигрупповой схеме, предложенной в работе [1].

На рис. 3—5 представлены кривые пространственного распределения потоков тепловых и надтепловых нейтронов, полученные в результате расчетов; здесь же приведены экспериментальные точки.

По методике, описанной в работе [2], были рассчитаны выходы захватного  $\gamma$ -излучения из экспериментальных сборок. На рис. 6 в виде функции от толщины блокирующего экрана приведены величины относительных выходов захватного  $\gamma$ -излучения  $\eta$ , рассчитанные и полученные экспериментально. Несовпадение полученных результатов с данными работы [3] объясняется различной толщиной стальных монолитов и различным составом сборок. В работе [3] эксперимент проводился для одного слоя железа толщиной  $25 \text{ см}$ , экранированного с обеих сторон карбидом бора; в настоящей работе исследовались композиции, включающие в себя достаточное число водородсодержащих слоев. Присутствие водорода снижает эффект блокировки.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Д. Л. Бродеру за ценные советы, а также В. Н. Дорофейкову, В. Г. Комову, Л. Г. Кочеровой, В. А. Лазукову и Ю. К. Спиваку за помощь в работе.

Поступило в Редакцию 22/V 1964 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Л. Бродер и др. «Атомная энергия», 12, 129 (1962).
2. Л. П. Бокачева, К. К. Попков, Л. Н. Таболдина. «Инж.-физ. ж.», VI, № 11, 85 (1963).
3. Д. Л. Бродер и др. «Атомная энергия», 8, 49 (1960).

УДК 539.122:539.121.73

## Пульсации температуры стенки трубы

### в условиях интенсивного конвективного теплообмена

В. И. Субботин, М. Х. Ибрагимов, В. И. Меркулов, Е. В. Номофилов, Н. А. Тычинский

В результате проведенных исследований были обнаружены пульсации температуры в теплоотдающей стенке при стационарном теплообмене. Однако причины, вызывающие появление пульсаций, различны.

При поперечном обтекании пучков тепловыделяющих стержней пульсации температуры в стенке обусловлены гидродинамической неустойчивостью потока, омывающего стержни [1]. При продольном обтекании пучков стержней, характеристики которых приведены в работе [2], пульсации температуры вызваны случайными перераспределениями расхода жидкости, а следовательно, и ее подогревом в отдельных ячейках. При этом расход жидкости через пучок остается постоянным. Величина пульсаций температуры зависит от длины участка обогрева (чем больше длина, тем больше амплитуда пульсаций). Гидродинамическая неустойчивость потока жидкости обусловлена внешними причинами (геометрией канала, входными условиями, отрывом крупных вихрей и т. д.), поэтому частота пульсаций температуры в стенке очень низкая, а амплитуда высокая. Пульсации температуры, выз-

ванные такой неустойчивостью потока, могут быть значительно уменьшены. Так, уменьшение шага пучка (при поперечном обтекании) или увеличение гидравлического сопротивления входа (при продольном обтекании) приводит к значительному снижению амплитуды пульсаций. При турбулентном течении теплоносителя в прямой круглой трубе пульсации температуры теплоотдающей стенки связаны, очевидно, с внутренней структурой потока [3].

В неизотермическом потоке жидкости, где существует градиент температуры по радиусу трубы, перемещение отдельной частицы (моля) из одного слоя в другой приводит к появлению пульсаций температуры в этом слое. Некоторые, наиболее интенсивно движущиеся моли, возможно, проникают до стенки трубы, вызывая в ней быстрые изменения температуры. Большая часть молей не достигает теплоотдающей стенки и распадается в «вязком» подслое вблизи стенки, вызывая в нем колебания температуры. Эти колебания за счет теплопроводности жидкости также передаются теплоотдающей стенке. Как при продольном,



так и при поперечном обтекании также возможны пульсации температур, вызванные турбулентностью самого потока. Однако, по-видимому, роль таких пульсаций относительно невелика. Затухание амплитуд пульсаций температур в вязком подслое и в твердой стенке происходит по экспоненте, причем степень ослабления пульсаций зависит от их частоты. Следовательно, интенсивность и спектральный состав пульсаций температур в стенке будет определяться интенсивностью и спектром пульсаций в пристенном слое. При небольших тепловых потоках [4], когда даже максимальная величина пульсаций составляет несколько градусов, в стенку трубы проникают пульсации заметной величины только при низких частотах (приблизительно 0,2—1 *гц*), а пульсации высокой частоты имеют пренебрежимо малую интенсивность. Интенсивность пульсаций температур в потоке теплоносителя растет прямо пропорционально тепловому потоку. Поэтому пульсации температур даже большой частоты ( $\sim 8 \div 10$  *гц*) при больших тепловых потоках обладают большими амплитудами и могут проникать в стенку трубы, сохраняя достаточно большую интенсивность. Следовательно, можно ожидать, что с увеличением теплового потока возрастет не только интенсивность пульсаций температур, но и изменится их спектральный состав, возрастет роль высокочастотных пульсаций.

Для высоконапряженных теплообменных устройств большое значение имеет статистическое изучение пульсаций температур в стенке при высоких тепловых потоках и различных условиях обтекания теплоотдающей поверхности.

Опыты по измерению пульсаций температур проводились в теплообменнике «труба в трубе» с внутренней трубой диаметром 24 *мм* и толщиной стенки 2 *мм* и наружной диаметром 41 *мм* и толщиной стенки 3 *мм*. Длина участка теплообмена была равна 900 *мм*. Через обе полости теплообменника прокачивался теплоноси-

тель различной температуры. Схема включения теплообменника в установку позволяла проводить опыты в условиях, близких к постоянному потоку или к постоянной температуре стенки. Тепловые потоки в опытах изменялись от  $1,3 \cdot 10^5$  до  $6 \cdot 10^5$  *вт/м<sup>2</sup>*. Температура стенки внутренней трубы измерялась микротермопарами хромель — алюмель с наружным диаметром 0,8 *мм* (методики изготовления и заделки термопар описаны в работе [5]).

Показания микротермопар регистрировались автоматическими потенциометрами ЭПП-09 с пределами измерений 0—1 и 0—2,5 *мв*, время пробега шкалы было равно 1 *сек*. Компенсация более высоких значений термо-э. д. с. осуществлялась потенциометром ТПТН-1. Скорость движения ленты составляла 21600 *мм/ч*.

Опыты проводились в диапазоне изменения чисел *Re* от  $65 \cdot 10^3$  до  $180 \cdot 10^3$ . Термопары фиксировали суперпозицию двух случайных процессов: турбулентные пульсации температур в жидкости, проникающие в стенку со стороны трубы и со стороны кольцевого зазора.

Анализ записанных пульсаций температур в стенке трубы показал:

1. Пульсации температур в стенке представляют собой стационарный случайный процесс с широким спектром частот (0,01—5 *гц*). Следовательно, изучение пульсаций необходимо проводить с помощью корреляционной теории случайных функций [6].

2. При постоянном тепловом потоке в исследованном диапазоне изменения чисел *Re* наблюдается увеличение средней частоты пульсаций температур с ростом скорости.

3. Характер пульсаций температуры стенки практически не зависит от граничных условий на теплоотдающей стенке. Пульсации температур, полученные при постоянном тепловом потоке (рис. 1, а) и постоянной температуре стенки (рис. 1, б), почти одинаковы.

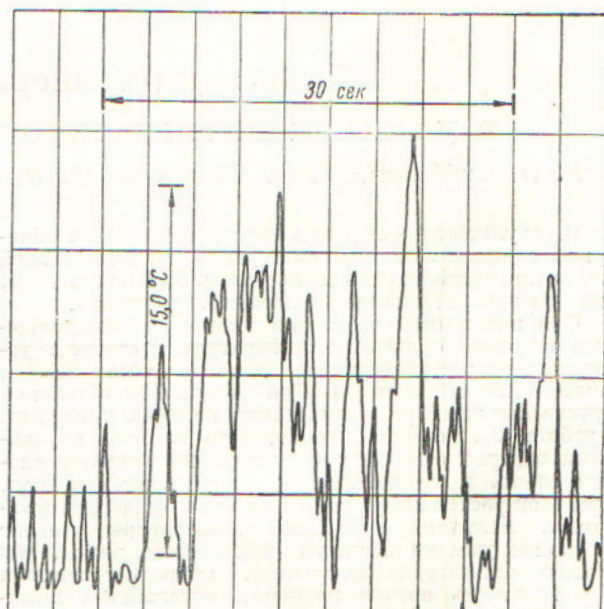
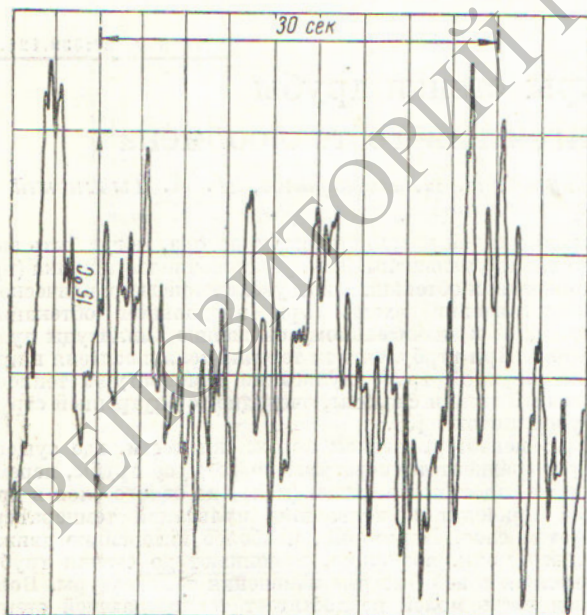


Рис. 1. Развертка пульсаций температур в стенке:

а —  $q = \text{const}$ ,  $Re = 6 \cdot 10^4$ ; б —  $t \approx \text{const}$ , в трубе  $Re = 2,7 \cdot 10^4$ , в кольцевом зазоре  $Re = 3,2 \cdot 10^5$ .



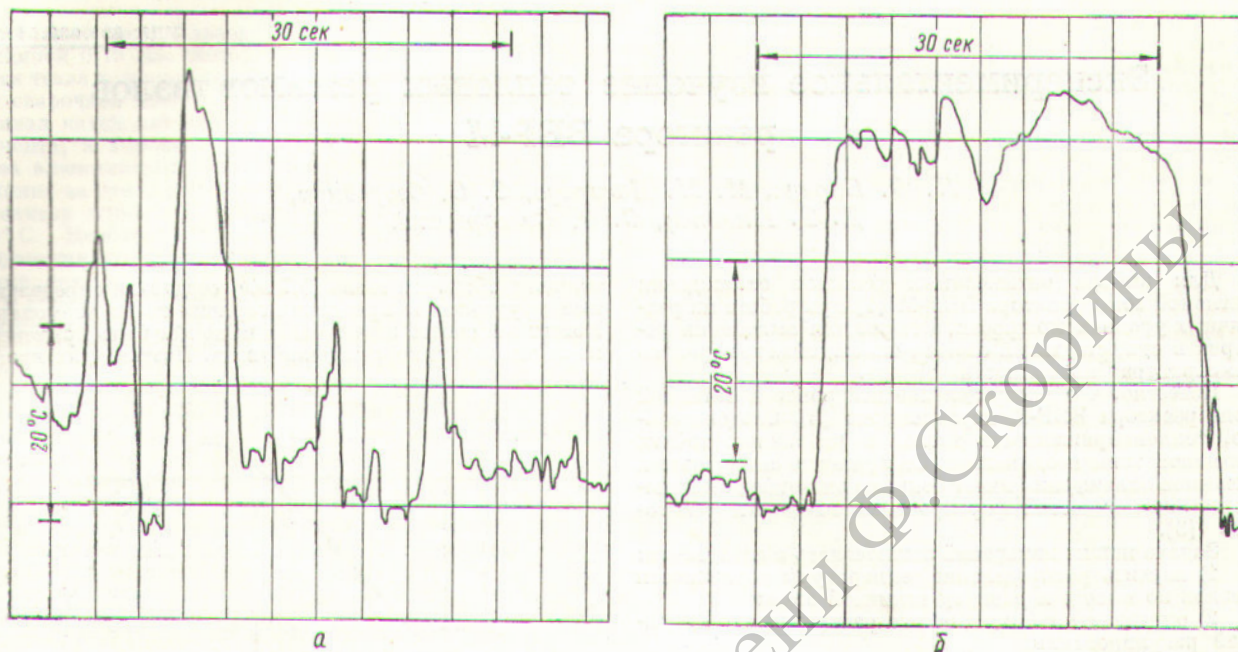


Рис. 2. Всплески температур стенки (а) и изменение ее температурного режима (б) при  $Re=1,5 \cdot 10^4$ .

4. Интенсивность пульсаций температур в стенке  $\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma t'^2}{n-1}}$  пропорциональна тепловому потоку. В исследованном диапазоне изменения чисел  $Re$  с увеличением скорости растет относительная интенсивность пульсаций температур  $\sigma/(t_{ст} - \bar{t}_ж)$ .

5. Большое влияние на характер пульсаций температур в стенке может оказывать состояние поверхности теплообмена. В нескольких опытах характер пульсаций температуры стенки существенно отличается от пульсаций, представленных на рис. 1, а, б. В этих опытах большую часть времени наблюдались пульсации малой частоты и амплитуды. Наряду с этим имели место сильные всплески температуры — до  $60^\circ\text{C}$  (рис. 2, а) и изменения температурного режима работы стенки (рис. 2, б). Можно предположить, что причиной изменения характера пульсаций температуры является неустойчивое контактное термическое сопротивление на границе раздела «стенка — жидкость». При наличии контактного сопротивления необходима экспериментальная проверка стационарности случайной функции, описывающей пульсации температур в стенке.

Результаты проведенных опытов показали, что даже в условиях стационарного турбулентного течения жидкости в стенке трубы возникают пульсации температур, вызванные неупорядоченностью турбулентного потока. Эти пульсации являются причиной появления быстропеременных термических напряжений. Влияние возникающих дополнительных напряжений на работоспособность конструкций, по-видимому, может быть существенным и должно учитываться в расчетах на прочность. Особую опасность такие напряжения представляют при наличии в теплоотдающей стенке микротрещин, глубоких пазов и т. п., вызывающих концентрацию напряжений. Так, в одном из опытов труба теплообменника с заделанными в прямоугольных пазах термонарами разрушилась в течение короткого

времени (около 10 ч). Пульсации температур в этом опыте достигали  $\pm 12 \div 15^\circ\text{C}$ . При небольших пульсациях температур ( $\pm 1 \div 2^\circ\text{C}$ ) подобные трубы работают в течение длительного времени.

Приведенные в статье результаты носят предварительный характер. Необходимо дальнейшее тщательное исследование статистических характеристик пульсаций температур в стенке каналов разной геометрии при внутреннем и внешнем обтекании теплоотдающей поверхности и при различном ее состоянии. Наряду с этим нужны методы расчета термических напряжений, возникающих под действием пульсаций температур.

Авторы выражают благодарность А. И. Лейпунскому за обсуждение работы и полезные советы.

Поступило в Редакцию 20/VIII 1964 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Субботин, В. Е. Минашин, Е. И. Денискин. «Теплофизика высоких температур», 1, 238 (1963).
2. В. И. Субботин и др. Доклад № 378, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. В. И. Субботин, М. Х. Ибрагимов, М. Н. Ивановский. «Атомная энергия», 8, стр. 254 (1960).
4. В. И. Субботин, М. Х. Ибрагимов, Е. В. Номофилов. «Теплоэнергетика», № 3, стр. 64 (1962).
5. В. И. Субботин и др. «Теплоэнергетика», № 2 (1965).
6. В. С. Пугачев. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического регулирования. М., Гостехиздат, 1957.