

03;12

## Резонансные явления при полной конденсации пара в охлаждаемой трубе

© Н.А. Прибатурин, М.В. Алексеев, В.А. Федоров

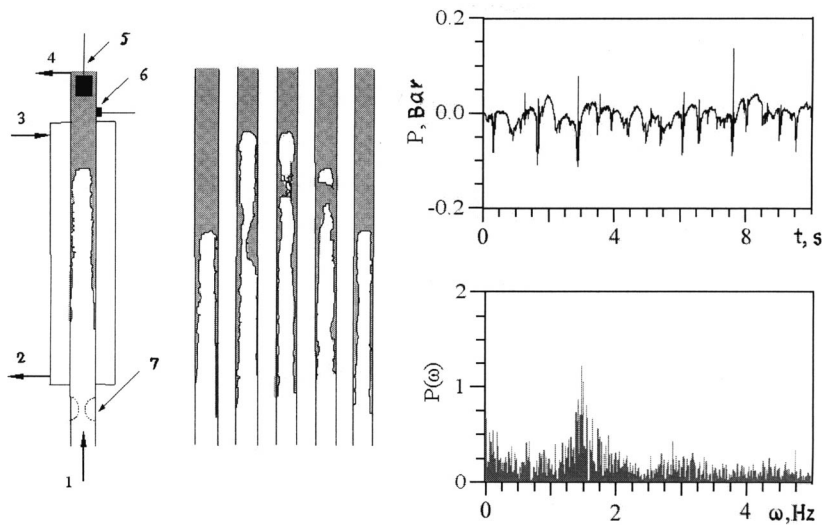
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск  
НПВП "Турбокон", Калуга  
E-mail: pribaturin@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 20 января 2000 г.

Экспериментально зафиксировано явление резонанса при конденсации пара внутри охлаждаемой трубы. Показано, что острота резонанса зависит от места приложения внешнего возмущения, а именно, возмущение действует на пар или конденсат.

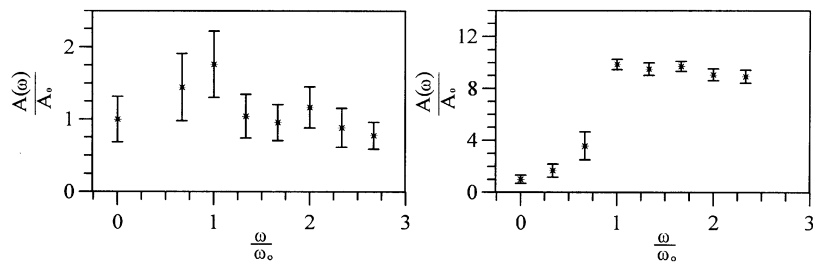
Рассмотрим конденсацию водяного пара, протекающего через трубу, наружная поверхность которой интенсивно охлаждается потоком холодной воды (рис. 1). При определенных параметрах охлаждения поступающий в трубу пар  $1$  полностью конденсируется внутри трубы так, что на выходе трубы существует только поток чистой жидкости  $2$ . В работах [1–4] было отмечено, что при таком процессе конденсации пара возникает неустойчивость, приводящая к развитию пульсаций потока конденсата и пара. Исследованиями установлено, что амплитуда пульсаций давления зависит от расхода пара и интенсивности отвода тепла от наружной поверхности трубы.

Результаты наших экспериментов показали, что природа пульсаций давления в трубе связана с периодическими колебаниями межфазной границы пар–жидкость. Один цикл такого колебания схематично показан на рис. 1. В результате конденсации пара образуется кольцевая пленка конденсата, движущаяся навстречу потоку пара. За счет существующего относительного движения фаз на границе кольцевой пленки жидкости и центрального парового ядра возникают поверхностные возмущения. Двигаясь вверх по течению, они увеличивают свою амплитуду и перекрывают поперечное сечение трубы сплошной пробкой жидкости. Осевая скорость пара падает по ходу течения за счет его конденсации. Образованный изолированный паровой снаряд имеет нулевую скорость пара в нем и начинает двигаться по потоку со скоростью



**Рис. 1.** Схема опытов, характерный профиль давления и его спектр: 1 — вход пара, 2, 3 — выход и вход охлаждающей воды, 4 — выход конденсата, 5 — поршень, 6 — датчик давления, 7 — резиновая диафрагма.

течения конденсата. При этом он быстро конденсируется, а наблюдаемая межфазная граница пар–жидкость возвращается на прежний уровень. Рассмотренное колебание межфазной границы вызывает синхронные этому процессу пульсации давления в трубе в зоне чистого конденсата (рис. 1). Движение границы вверх вызывает повышение давления, вниз — его понижение, а быстрое исчезновение сырья генерирует на фоне общего понижения давления импульс давления, имеющий малую длительность и амплитуду, превышающую основной сигнал. В спектре выделяется преобладающая зона частот с наиболее предпочтительной основной частотой пульсаций. Ширина этой зоны с максимумом на основной частоте хорошо соответствует распределению Гаусса. Значение основной частоты равно 1.5 Hz, а величина дисперсии составляет 0.38 Hz. Такие значения получены при полной конденсации потока пара воды с расходом  $6 \cdot 10^{-4}$  kg/s, температурой 103°C, давлением 0.3 МПа, поступающего в стеклянную трубу внутренним диаметром 8 mm, длиной



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды пульсаций давления от частоты внешнего возмущения: *a* — возмущение конденсата; *b* — возмущение пара.

0.75 m и охлаждаемую водой с температурой 12°C. Тепловая мощность такого однетрубчатого противоточного конденсатора составляла 0.25–0.32 kW/m<sup>2</sup>.

Таким образом, для процесса полной конденсации пара внутри трубы можно говорить о существовании основной частоты пульсаций давления. Поскольку эти пульсации связаны с колебаниями межфазной границы пар–жидкость, то данную частоту можно рассматривать как собственную частоту колебаний системы конденсирующийся пар–жидкость.

Естественно предположить, что всякое вынужденное возмущение на такую систему как со стороны пара, так и со стороны конденсата с частотой, равной выделенной выше частоте собственных колебаний, может привести к резонансным явлениям. На рис. 2 приведена амплитудно-частотная зависимость пульсаций давления внутри трубы при вынужденном возбуждении жидкого конденсата и потока пара. Возбуждение осуществлялось при помощи перемещения поршня 5 в конденсате и колебания резиновой оболочки 7 в потоке пара (рис. 1).  $A_0$  и  $\omega_0 = 1.5$  Hz — соответственно средняя амплитуда и основная (собственная) частота пульсаций давления в трубе при отсутствии внешнего воздействия. Как видно, действительно при совпадении частоты вынужденных воздействий и собственной частоты системы конденсирующийся пар–жидкость наблюдается увеличение амплитуды пульсаций давления. При уменьшении и превышении частоты вынужденных колебаний по отношению к собственной частоте системы происходит падение амплитуды пульсаций до значения, соответствующего невозмущенным колебаниям. Существенную роль играет точка приложения внешнего

воздействия: при совпадении частоты вынужденного воздействия, действующего на пар с собственной частотой системы, наблюдается более острый резонанс, чем при вынужденном возбуждении конденсата. В первом случае амплитуда пульсаций возрастает в 10 раз, в то время как во втором — только около 2 раз.

Вынужденное возмущение конденсата на резонансной частоте приводит не только к усилению амплитуды пульсаций давления, но и к наполнению спектра более низкими частотами, чем собственная частота системы. Возмущение пара на резонансной частоте вызывает практически синусоидальные пульсации давления в трубе, на вершинах которых регулярно располагаются короткие импульсы давления. Такая форма профиля пульсации давления обусловлена циклическим, синхронным с внешним воздействием на пар, движением границы пар–жидкость с образованием и схлопыванием одиночного парового снаряда за один цикл колебаний. Форма спектра характеризуется более ярким выделением резонансной частоты и генерацией кратной ей второй гармоники на частоте 3 Hz.

Таким образом, можно говорить о различной добротности кажущихся на первый взгляд одинаковыми колебательных систем пар–жидкость и жидкость–пар. Разница в поведении систем может быть объяснена несимметричностью отвода тепла конденсации через боковую поверхность трубы, которая всегда поддерживается постоянной, и интенсивностью конденсации пара при изменении места приложения внешнего возмущения. Более быстрая конденсация пара при его возмущении происходит за счет снижения его динамического напора в фазе разрежения и существования более развитой поверхности теплообмена на момент наступления этой фазы по сравнению с фазой сжатия. Это запаздывание обусловлено инерцией пробки жидкого конденсата. При вынужденном возмущении потока конденсата изменения, касающиеся давления и скоростного напора пара, незначительные за счет малой восприимчивости возмущений развитым паровым ядром.

Интересно также отметить, что вынужденное воздействие на данную систему с зарезонансными частотами проявляется различным образом в зависимости от места приложения внешнего возмущения. В случае возмущения потока конденсата данная система действует как высокочастотный фильтр, вырезая все возмущения с частотами выше собственной частоты. Возбуждение потока пара в ней приводит к такому эффекту: амплитуда колебаний снижается незначительно.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-02-17812).

## Список литературы

- [1] *Rabas T.A., Minard P.G.* // Heat Transfer Eng. 1987. V. 8. N 1. P. 40–49.
- [2] *Bkhat B.L., Vedekaind G.L.* // Trans. ASME. Heat Transfer. 1980. V. 102. N 4. P. 113–121.
- [3] *Fedorov V.A.* // Russian J. Eng. Thermophysics. 1996. N 4. P. 63–72.
- [4] *Milman O.O., Fedorov V.A., Pribaturin N.A., Lezhnin S.I.* // ICNF-98 III Intern. Conference on Multiphase Flow. Lyon, France, 1998. CD N 630. 8 p.