



# ЭВОЛЮЦИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОНТАКТЕ ХОЛОДНОЙ ВОДЫ И НАСЫЩЕННОГО ПАРА<sup>1</sup>

*С. И. Лежнин, А. Л. Сорокин, Н. А. Прибатурин*

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе, СО РАН, Новосибирск

**Аннотация.** Исследован процесс распространения волны разрежения при внезапном контакте холодной воды и насыщенного пара. Показано, что наиболее интенсивно конденсация пара происходит на интервале времени около 0.01 мс, в течение которого поверхность воды нагревается. Затем устанавливается постоянный перепад температуры 2–3 градуса между поверхностью воды и паром и интенсивность конденсации снижается.

**Ключевые слова:** конденсация, насыщенный пар, волна разрежения

---

## 1 Введение

В данной работе рассматривается одномерная модельная задача о контакте холодной воды и насыщенного пара. Предполагается, что первоначально вода и пар разделены теплоизолирующей перегородкой находятся при одинаковых давлениях и различных температурах (Рис. 1). При мгновенном удалении перегородки от поверхности контакта начинается распространение волн разрежения, возникающих вследствие интенсивной конденсации пара на поверхности воды. Данная модельная задача была рассмотрена в предположении постоянства температуры поверхности воды, то есть интенсивном перемешивании, в работе [1]. В этом случае образуется волна разрежения, уходящая в паровую область. В отличие от [1] в данной работе предполагается полное отсутствие влияния перемешивания на температуры поверхности воды, то есть нагрев полностью определяется конденсацией пара и теплопроводностью в жидкости.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-02-16473-а)

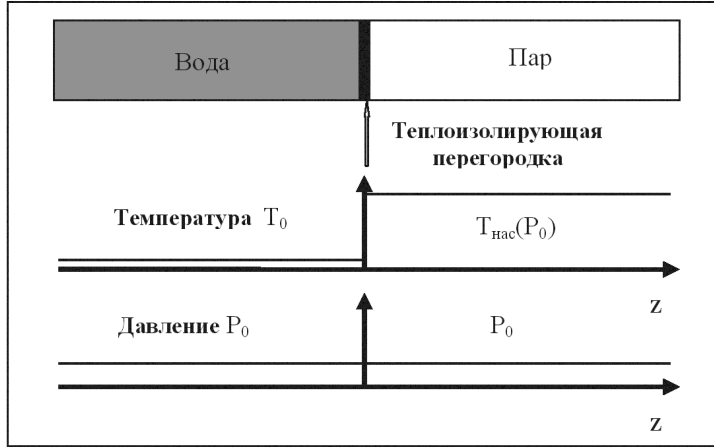


Рис. 1. Начальное состояние на межфазной границе: объем пара и жидкости разделены теплоизолирующей перегородкой.  $T_v(0) = T_{НАС}(P_0) > T_0 = T_l(0)P_l(0) = P_v(0) = P_0 = P_{АТМ}$

## 2 Аналитическая модель

При построении модели предполагалось, что межфазная граница остается плоской и неподвижной, а выделяющееся на ней при конденсации пара тепло отводится нестационарной теплопроводностью в жидкости.

Пар рассматривался как идеальный совершенный газ, движущийся адиабатически с показателем адиабаты  $\gamma$ . Предполагалось выполнение локального термодинамического равновесия в паре. Интенсивность конденсации определяется линейным уравнением кинетики Герца–Кнудсена–Ленгмюра:

$$j = \beta \sqrt{\sqrt{2\pi RT_{НАС}} (P_{BN})} [P_{НАС}(T_{BN}) - P_{BN}]. \quad (1)$$

Тепловой поток на межфазной границе связан с потоком массы конденсата и определяется в одномерной постановке выражением [2]:

$$q_{BN} = jr = -\lambda_l \int_0^t \frac{\frac{\partial T_{BN}}{\partial t'}}{\sqrt{\pi a_l(t-t')}} dt'. \quad (2)$$

Из уравнения линейной волны давления, распространяющейся вправо:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + c_v \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

следует, что на межфазной границе в линейном приближении:

$$\rho_{v,BN} \frac{\partial u_{v,BN}}{\partial t} = -\frac{\partial P_{BN}}{\partial x} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial P_{BN}}{\partial t}. \quad (4)$$

Интегрирования (4) с учетом начального давления в паре дает:

$$\rho_{v,BN} u_{v,BN} = j = \frac{1}{c_v} (P_{BN} - P_0) = \frac{1}{c_v} (P_{BN} - P_{ATM}). \quad (5)$$

Из (2) и (5) следует:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_v} (P_{BN} - P_0) &= A [P_{HAC}(T_{BN}) - P_{BN}] = \\ &= -\frac{\lambda_l}{r} \int_0^t \frac{\frac{\partial T_{BN}}{\partial t'}}{\sqrt{\pi a_l(t-t')}} dt'. \end{aligned} \quad (6)$$

После линеаризации (6) получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_v} (P_{BN} - P_{ATM}) &= C [P_{HAC}(T_{BN}) - P_{BN}] = \\ &= -\frac{\lambda_l}{r} \int_0^t \frac{\frac{\partial T_{BN}}{\partial t'}}{\sqrt{\pi a_l(t-t')}} dt'. \end{aligned} \quad (7)$$

где  $C = \beta / \sqrt{2\pi R T_{HAC}(P_0)}$ . Введем безразмерное время  $\tau = c_v t / 2L_v$ . После обезразмеривания уравнение (7) принимает вид:

$$-A \int_0^\tau \frac{\frac{\partial P_{BN}}{\partial \tau'}}{\sqrt{\pi(\tau-\tau')}} d\tau' = P_{BN} - P_0, \quad (8)$$

где  $A = \frac{\lambda_l T_l c_v}{r^2 \rho_v \sqrt{a_l t_0}}$ . Решение уравнения (8), полученное с помощью преобразования Лапласа, имеет следующий вид:

$$P_{BN}(\tau) = P_0 - \Delta P \cdot \exp\left(\frac{\tau}{A^2}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\tau}}{A}\right). \quad (9)$$

### 3 Численное моделирование

Для численного моделирования волны разрежения, образующейся при мгновенном контакте холодной воды и насыщенного пара, использовался пакет программ LCPFCT[4]. Пар рассматривался как идеальный газ с показателем адиабаты  $\gamma=1.33$ . Уравнение теплопроводности, описывающее нагрев воды при конденсации пара на ее поверхности, решалось с использованием явной разностной схемы. При интегрировании уравнений

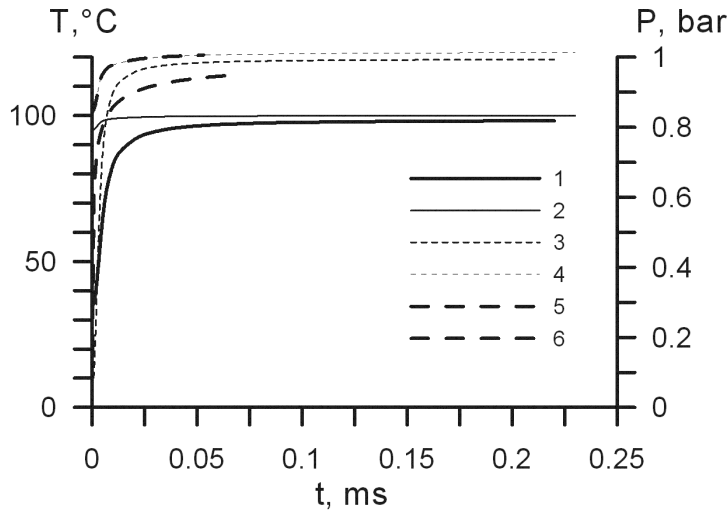


Рис. 2. Температура и давление на поверхности воды. Расчет: температура 1 —  $T_0 = 35^\circ\text{C}$ , 2 —  $T_0 = 95^\circ\text{C}$ ; давление 3 —  $T_0 = 35^\circ\text{C}$ , 4 —  $T_0 = 95^\circ\text{C}$ . Аналитическое решение (9): 5 —  $T_0 = 35^\circ\text{C}$ , 6 —  $T_0 = 95^\circ\text{C}$

газодинамики граничные условия на поверхности воды ставились с использованием формулы (6). По вычисленному на шаге интегрирования потоку массы определялся поток тепла при конденсации на поверхности воды, который являлся граничным условием для уравнения теплопроводности.

Результаты расчетов для температуры поверхности воды представлены на Рис. 2, где приведено также сравнения с расчетами в линейном приближении по формуле (9). На интервале времени менее 0.01 мс наблюдается интенсивный нагрев поверхности, после которого устанавливается разность температуры пара и воды около  $2\text{--}3^\circ\text{C}$  на интервале времени пробега волны разрежения до твердой границы и обратно. Аналитическое решение практически совпадает с результатами расчета при  $T_0 = 95^\circ\text{C}$ , при  $T_0 = 35^\circ\text{C}$  имеется значительное расхождение, обусловленное нелинейностью. Картина распространения волны разрежения в паре представлена на Рис. 3. Как видно, минимум давления в волне заметно зависит от начальной температуры поверхности воды. На интервале времени пробега до твердой границы паровой области этот минимум давления уменьшается, что определяется нелинейными эффектами. Зависимость доли сконденсировавшейся массы пара от времени представлена на Рис. 4. Наиболее интенсивно конденсация происходит в интервале времени менее 0.01 мс, после которого устанавливается постоянная температуры поверхности воды и происходит линейный рост доли конденсата. К приходу отраженной волны разрежения конденсируется 3–6% начальной массы пара.

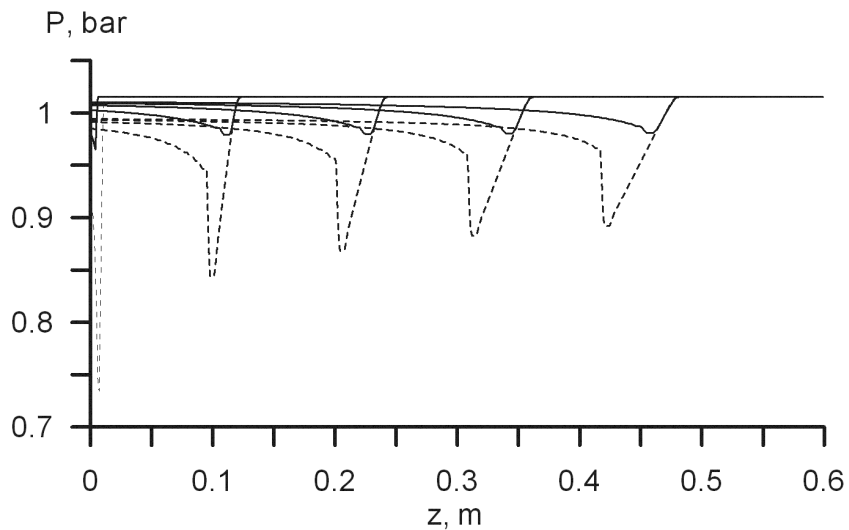


Рис. 3. Распространение волны разрежения. Сплошная линия —  $t_0 = 95^\circ\text{C}$ , пунктир —  $t_0 = 35^\circ\text{C}$

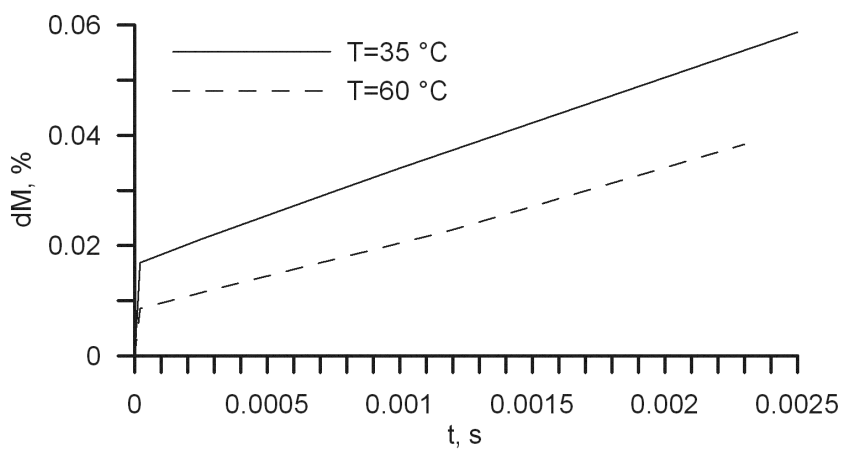


Рис. 4. Зависимость массовой доли конденсата от времени

## 4 Выводы

Таким образом, можно выделить два качественно различных этапа взаимодействия холодной воды и насыщенного пара при внезапном контакте. На первом, длительностью около 0.01 мс, происходит быстрое увеличение температуры поверхности воды. На втором, до прихода отраженной волны разрежения, разность температуры пара и поверхности воды составляет несколько градусов и масса конденсата линейно зависит от времени.

### Условные обозначения

$c_v$  — скорость звука в паре, м/с;  $C_{pl}$  — удельная теплоемкость жидкости, Дж/кг·К;  $j$  — интенсивность конденсации на межфазной границе (удельный поток сконденсированного пара), кг·м/с;  $L_v$  — длина паровой области;  $P$  — давление, Па;  $P_0 = P_{ATM}$  — начальное (атмосферное) давление, Па;  $R$  — газовая постоянная, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>·К;  $r$  — скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг;  $t$  — время, с;  $T$  — температура, К;  $T_0 = T_l(0)$  — начальная температура холодной жидкости, К;  $T_{НАС}(P_0) = T_v(0)$  — начальная температура насыщенного при атмосферном давлении пара, К;  $\Delta P = P_{ATM} - P_{НАС}(T_l) = P_0 - P_{НАС}(T_l)$ , Па;  $\Delta T = T_v(0) - T_l(0) = T_{НАС}(P_0) - T_0$ , К;  $u_v$  — скорость пара за волной разрежения; м/с;  $z$  — продольная координата, м;  $\beta$  — коэффициент аккомодации (конденсации);  $\gamma$  — показатель адиабаты пара;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

### Индексы

0 — начальное состояние;  $l$  — вода;  $v$  — пар;  $ATM$  — атмосфера;  $НАС$  — фазовое равновесия (насыщение);  $BN$  — межфазная граница.

## Список литературы

- [1] Лежнин С. И., Прибатурин Н. А., Сорокин А. Л. Моделирование эволюции давления и температуры при внезапном контакте холодной воды и насыщенного пара // XXVII Сибирский теплофизический семинар, 12–14 октября 2005. Статья № 074.
- [2] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
- [3] Лежнин С. И., Актершев С. П. Динамика парового снаряда в канале // Теплофизика и аэромеханика. 1994. Т. 1, № 2. С. 97–110.
- [4] Jay P. Boris, Alexandra M. Landsberg, Elaine S. Oran, John H. Garder. LCPFCT – Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations // NRL/MR/6410–93–7192.