

УДК 532.529

## **Моделирование эволюции импульса разрежения при контакте холодной жидкости и насыщенного пара\***

**С.И. Лежнин, А.Л. Сорокин**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: lezhnin@itp.nsc.ru

Исследован процесс распространения волны разрежения в насыщенном паре при его внезапном контакте с холодной жидкостью.

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

Если первоначально разделенные теплоизолирующей перегородкой холодную жидкость и ее пар мгновенно привести в контакт, то вследствие интенсивной конденсации на межфазной поверхности образуется волна разрежения [1–3]. При этом первоначально насыщенный пар становится перегретым.

При интенсивной конденсации пара необходимо детально моделировать процессы переноса в кнудсеновском слое [4]. Используемые для описания тепломассопереноса в этом слое соотношения содержат коэффициент конденсации (материальной аккомодации)  $\beta$ , числовое значение которого не определяется в рамках кинетической теории. Источником информации о числовом значении коэффициента аккомодации служит физический и численный эксперимент (молекулярная динамика). Интервал физически допустимых значений коэффициента аккомодации  $0 < \beta < 1$  [4, 5]. Известно, что даже при незначительном уменьшении значения коэффициента аккомодации интенсивность конденсации резко снижается из-за экранирующего влияния потока отраженных молекул. Снижение интенсивности генерируемой межфазной поверхностью волны при уменьшении коэффициента  $\beta$  в линейном приближении отмечалось в работе [3]. Согласно существующим представлениям [4], для ряда чистых веществ при не очень высоких давлениях можно считать  $\beta \approx 1$ .

Известно также, что при снижении коэффициента конденсации увеличивается продолжительность нестационарного процесса, однако она не превышает нескольких микросекунд. Таким образом, возможно использование стационарных кинетических соотношений при исследовании контактного взаимодействия горя-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00629-а).

чего пара с холодной жидкостью при произвольном значении коэффициента конденсации. В настоящей работе интенсивность конденсации определяется линейным уравнением кинетики Герца–Кнудсена–Ленгмюра [4, 5].

Ранее модельная задача контакта холодная жидкость–пар была рассмотрена в предположении постоянства температуры поверхности воды, т. е. для асимптотической модели полного перемешивания жидкости на межфазной поверхности [1]. Для этого предельного случая предложен кинетический режим конденсации [4, 5], а именно: температура жидкости на межфазной границе остается равной начальной температуре  $T_0$ , количество сконденсировавшегося пара лимитируется неравновесными процессами в кнудсеновском слое. При этом удельный поток массы на границе принимался равным

$$j = \rho_{2,SAT}(P) \beta \left( \frac{T_{SAT}(P) - T_0}{T_{SAT}(P)} \right) \sqrt{\frac{RT_{SAT}(P)}{2\pi}}. \quad (1)$$

На малых временах процесса от границы контакта в пар будет распространяться волна разрежения в виде расплывающейся ступеньки. В процессе распространения волны скорость  $u_2$  и давление  $P$  в любой точке области, занятой паром, определяется из точного автомодельного решения [6]:

$$u_2(x, t) = \begin{cases} U & \text{при } 0 \leq \frac{x}{t} \leq C_2(P_0) - \frac{\gamma-1}{2}U, \\ \frac{2}{\gamma+1} \left( C_2(P_0) - \frac{x}{t} \right) & \text{при } C_2(P_0) - \frac{\gamma-1}{2}U \leq \frac{x}{t} \leq C_2(P_0), \end{cases} \quad (2)$$

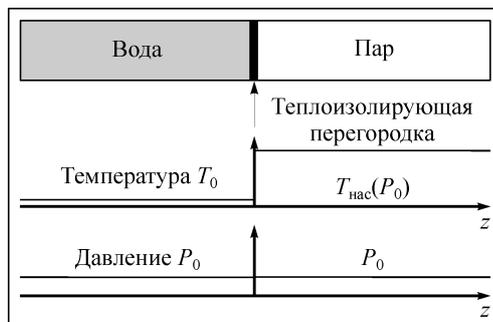
$$P(x, t) = P_0 \left[ 1 - \frac{\gamma-1}{2} \frac{u_2(x, t)}{C_2(P_0)} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}. \quad (3)$$

Здесь  $P_0$  — начальное давление в паре (рис. 1),  $C_2(P)$  — скорость звука в паре,  $\gamma$  — показатель адиабаты пара.

При этом скорость пара на межфазной границе

$$U = \frac{2C_2(P_0)}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{in}}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right], \quad (4)$$

а для определения установившегося давления пара на межфазной границе  $P_{in}$  ( $P_{in} < P_0$ ) используется формула для потока массы (1). Анализ решений (2), (3), (4) показал, что с увеличением температуры жидкости  $T_0$  амплитуда движущейся по пару волны разрежения слабо падает.



В работе [2] в линейном приближении получено аналитическое решение для случая отсутствия перемешивания жидкости на межфазной грани-

Рис. 1. Начальное состояние на межфазной границе: объем пара и жидкости разделены теплоизолирующей перегородкой.

$$T_v(0) = T_{нас}(P_0) > T_0 = T_l(0), P_l(0) = P_v(0) = P_0 = P_{атм}.$$

Рис. 2. Зависимость температуры межфазной поверхности от времени.

$T_{ж} = 95$  (1),  $35$  (2) °С.

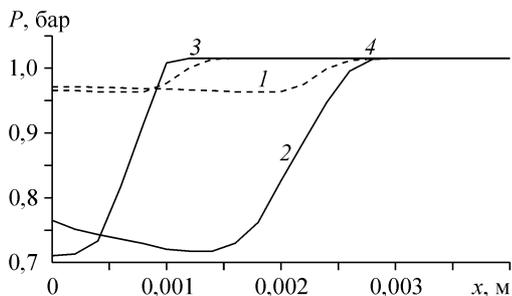
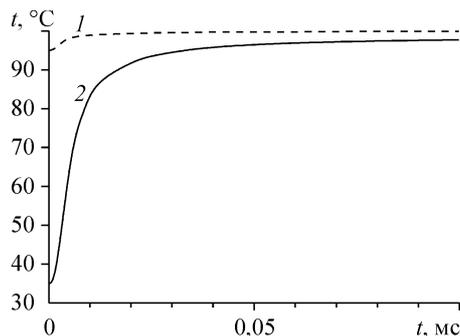
це, которое, как показано, удовлетворительно описывает эволюцию сигнала лишь при  $\Delta P/P \ll 1$ .

В настоящей работе задача решается в полной одномерной газодинамической постановке. Начальные значения температуры и давления в жидкости и паре приведены на схеме (см. рис. 1). При построении модели предполагалось, что межфазная граница остается плоской и неподвижной, а выделяющееся на ней при конденсации пара тепло отводится нестационарной теплопроводностью в жидкости.

Для численного моделирования формирующейся волны разрежения использовался пакет программ [7], в основе которого заложен модуль решения одномерного нестационарного уравнения конвективного переноса скалярной субстанции с "источниковым" членом общего вида. Особенность используемого в пакете метода гарантирует в расчетах неотрицательность плотности среды. Уравнение теплопроводности, описывающее нагрев воды при конденсации пара на ее поверхности, решалось с использованием явной разностной схемы. По вычисленному на шаге интегрирования системы уравнений газодинамики потоку массы определялся поток тепла при конденсации на поверхности воды, который являлся граничным условием для уравнения теплопроводности. Все расчеты проводились для воды и ее насыщенного пара с коэффициентом конденсации  $\beta = 1$ .

На рис. 2 приведена зависимость температуры межфазной поверхности от времени при различных значениях начальной температуры воды. При начальной температуре 35 °С температура поверхности воды на интервале времени 0,01 мс нарастает, но остается ниже 100 °С, а при начальной температуре 95 °С нарастает до 97,8 °С и далее остается практически постоянной.

Формирование волны давления при различных значениях начальной температуры воды показано на рис. 3. За волной разрежения, образующейся в момент контакта, начинает формироваться волна сжатия, образующаяся при нагреве межфазной поверхности. Дальнейшая эволюция волны давления представлена на рис. 4. Как видно, амплитуда импульса разрежения (величина минимума давления) заметно зависит от начальной температуры воды. Кроме того, с увеличением расстояния от границы амплитуда импульса уменьшается, что определяется нелинейными эффектами, т. к. волна сжатия будет догонять волну разрежения. То есть уменьшение амплитуды импульса разрежения определяется нелинейным бездиссипативным затуханием. Если формально рассмотреть случай  $\lambda_1 \rightarrow \infty$  (бесконечно



большой теплопроводности жидкости), то это будет эквивалентно полному перемешиванию жидко-

Рис. 3. Формирование волны давления, генерируемой межфазной поверхностью в паре при различных начальных температурах жидкости.

$T_{ж} = 95$  (1),  $35$  (2) °С,  $t = 0,005$  (3),  $0,01$  (4) мс.

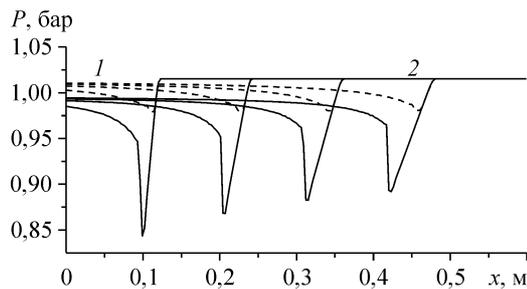


Рис. 4. Эволюция волны давления, генерируемой межфазной поверхностью в паре при различных начальных температурах жидкости. Интервал времени между расчетными кривыми 0,25 мс.

$T_{ж} = 95$  (1), 35 (2) °С.

сти на межфазной поверхности. При этом задний фронт отрицательного импульса давления (см. рис. 4) будет выхолаживаться, а численное решение асимптотически стремится к аналитическому решению для волны разрежения в виде расплывающейся ступеньки (2)–(4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. Асимптотические динамические модели при фазовых превращениях // Тр. 3-й Межд. науч. конф. "Хаос и структуры в нелинейных системах. теория и эксперимент". Т. 2. Астана, Казахстан. 2006. С. 58–62.
2. Лежнин С.И., Прибатурин Н.А., Сорокин А.Л. Эволюции давления и температуры при внезапном контакте холодной воды и насыщенного пара // Тр. Ин-та механики УНЦ РАН. Вып. 5. Уфа: Гилем, 2007. С. 261–266.
3. Лежнин С.И., Сорокин А.Л. Генерация волн давления на межфазной границе "жидкость–пар" и их эволюция // Теплообмен ММФ-2000: Материалы VI Минского Межд. форума: Т. 2. 19-23 мая 2008 г. Минск, 2008. С. 62–64.
4. Лабунцов Д.А., Ягов В.В., Крюков А.П. Основы механики двухфазных систем. М.: Издательство МЭИ, 1988. 76 с.
5. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. литературы, 1987. Ч. I. 330 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1986. 736 с.
7. Boris J.P., Landsberg A.M., Oran E.S., Garder J.H. LCPFCT flux-corrected transport algorithm for solving generalized continuity equations. Naval Research Lab. Memorandum 6410-93-7192, April, 1993.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2009 г.