

К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2005. – 140 с.

2. *Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В.* Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 5: Теплообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. – К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2005. – 500 с.

3. *Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Алексеев В.В.* Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. – М.: Изд. Московского энергетического ин-та, 2005. – 83 с.

4. *H.K. Moon, T. O'Connell and R. Sharma* Heat transfer enhancement using a convex-patterned surface // The American society of mechanical engineers, June 2002. GT2002-30476 San Diego, USA. – P.1-9.

5. *Borisov I., Khalatov A., Kobzar S., & Glezer B.* Heat transfer and pressure losses in a narrow dimpled channel structured with spherical protrusions. //Proceedings of ASME Turbo Expo 50, 2004. GT2004-54204 Reno, USA. – P.1-15.

6. *Борисов И.И., Халатов А.А., Кобзарь С.Г.* Теплообмен и сопротивление в щелевых каналах со сферическими углублениями и дистанционирующими элементами //Промышленная теплотехника. – 2005. – 27, №5. – С. 10-17

7. *Gazi I. Mahmood, Mounir Z. Sabbah and Phillip M. Ligrani.* Heat transfer in a channel with dimples and protrusions on opposite walls // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 15. № 3. July-September 2001. – P. 275-283.

Получено 19.03.2006 г.

УДК 621.01.216

ПАВЛЕНКО А.М.<sup>1</sup>, КЛИМОВ Р.А.<sup>1</sup>, БАСОК Б.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Днепродзержинский государственный технический университет

<sup>2</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

## КИНЕТИКА ИСПАРЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ГОМОГЕНИЗАЦИИ

Процеси спонтанного закипання перегрітих рідин в умовах, коли рідина опиняється в нерівноважному метастабільному стані, викликають найбільший інтерес, оскільки вивчення кінетики порушення метастабільного стану може сприяти створенню нових високоінтенсивних технологій при виробництві емульсій. В даній роботі проводиться дослідження процесу руйнування масляних плівок емульсії типу вода-масло з урахуванням як теплової, так і динамічної задачі.

Процессы спонтанного вскипания перегретых жидкостей в условиях, когда жидкость оказывается в неравновесном метастабильном состоянии, вызывают наибольший интерес, так как изучение кинетики нарушения метастабильного состояния может способствовать созданию новых высокоинтенсивных технологий при производстве эмульсий. В данной работе проводится исследование процесса разрушения масляных пленок эмульсии типа вода-масло с учетом как тепловой, так и динамической задачи.

Processes of the spontaneous boiling of the overheated liquids up in the conditions when a liquid turns out in the not equilibrium state, most interest is caused, because the study of kinetics of violation of the state can be instrumental in creation of new high-intensive technologies at creation of emulsions. In the given work the research of process of destruction of oily tapes of emulsion of type is conducted water-oil with the account of party of task both thermal, and dynamic.

$a$  – коэффициент температуропроводности;

$c$  – удельная теплоемкость;

$F$  – площадь;

$L$  – теплота парообразования;

$m$  – масса;

$\Delta m$  – массовый поток;

$M_n$  – молекулярная масса;

$p$  – давление;

$Q$  – теплота;

$q$  – удельный тепловой поток;

$R, r$  – радиус;  
 $T, t$  – температура;  
 $V$  – объем;  
 $w$  – скорость движения;  
 $\Re$  – универсальная газовая постоянная;  
 $\alpha$  – коэффициент теплообмена;  
 $\alpha_m$  – коэффициент испарения;  
 $\delta$  – толщина;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\sigma$  – межфазное натяжение;  
 $\tau$  – время.

Большинство задач кипения жидкости ставили своей целью изучение динамики роста паровых пузырьков, которые возникают либо в объеме жидкости, либо на перегретой поверхности. Особенностью вскипания эмульсионных сред является то, что образование паровой фазы будет происходить на поверхности раздела жидкостей, если одна жидкость (например, масло) является поверхностно-активным веществом (ПАВ), либо в эмульсии присутствует инородное ПАВ (в многокомпонентных эмульсиях), что основано на снижении межфазного натяжения на границе раздела дисперсионная среда (вода) – дисперсная фаза (масло). Опытные данные [1] свидетельствуют о том, что процесс образования новой фазы (пара) инициируется внутренним тепловым воздействием на поверхности масляных частиц. Таким образом, например, при резком сбросе давления предварительно нагретая эмульсия будет оказываться в состоянии пересыщения термодинамически-водной фазы (вода перегрета относительно температуры насыщения при данном давлении), т.е. содержать избыточное количество теплоты. Этот избыток теплоты затрачивается на работу образования паровой прослойки и дальнейшее парообразование. Влияние масляных пленок неоднозначно: во-первых, при нагревании они играют роль термического сопротивления, тем самым замедляя процессы нагрева; во-вторых, являются аккумуляторами теплоты, которая может быть использована для образования и роста паровой фазы; в-третьих, также являются ПАВ, что способствует достижению меньших температур пересыщения воды, т.е. раннему

#### Нижние индексы:

0 – начальное значение;  
 1 – центр;  
 2 – граница раздела вода-пар;  
 3 – граница раздела масло-пар;  
 4 – граница раздела масло-воздух;  
 $cr$  – критическое;  
 $атм$  – атмосферное;  
 $нас$  – насыщения;  
 $м$  – масло;  
 $п$  – пар;  
 $воз$  – воздух.

вскипанию. Учет теплового воздействия со стороны масла играет большую роль в рассмотрении процессов тепломассообмена при вскипании эмульсионных сред. Теоретическое описание и обоснование процессов тепломассообмена в эмульсиях, связанное с наличием масляных пленок, позволит более детально изучить сам процесс, а также предложить оптимальные параметры и характеристики для технологий получения и обработки мелкодисперсной эмульсии.

#### Постановка задачи

Рассмотрим каплю эмульсии (рис. 1), которая состоит из капли воды, покрытой слоем масла, в момент уже появившейся паровой прослойки. В начальный момент времени эта система находится под каким-либо давлением  $p_0$  (например,  $p_0 > p_{атм}$ ) и при температуре  $T_0$  (например,  $T_0 = T_{нас}(p_0)$ ). В некоторый момент времени система оказывается в зоне пониженного давления  $p_4$  ( $p_4 < p_0$ ). Таким образом, рост парового объема и испарение воды будут происходить из-за того,

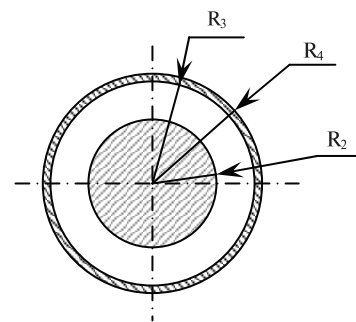


Рис. 1. К расчетной модели роста паровой фазы.

что вода является перегретой относительно давления  $p_4$ . Движение границы раздела масло-пар будет происходить под действием разности давлений внутри парового объема  $p_n$  и давления на поверхности слоя масла  $p_4$ . При этом вся система будет нагреваться воздухом с температурой  $T_{воз}$ .

Большинство методик расчета радиального движения жидкости на границе со сферической полостью используют уравнение Релея [2, 3]. Принимая отсутствие какого-либо газа в паровом объеме, т.е. данный объем состоит только из пара, с учетом капиллярных сил и касательных напряжений, уравнение для скорости радиального движения границы раздела масло-пар при наличии масляной пленки с наружным радиусом  $R_4$  примет вид:

$$\frac{dw_3}{d\tau} = \frac{p_3 - p_4 - 1,5\rho_m w_3^2}{\rho_m R_3} + \frac{w_3^2 \left[ 1 + R_3/R_4 + (R_3/R_4)^2 \right]}{2R_3}, \quad (1)$$

где  $p_3 = p_n - 2\sigma_3/R_3 - 4\mu_m w_3/R_3$ .

Уравнение (1) представляет собой уравнение Релея-Плессета для ограниченного сферического объема.

При отсутствии фазовых переходов на границе раздела можно записать:

$$\frac{dR_3}{d\tau} = w_3. \quad (2)$$

Для определения температуры внутри парового объема можно воспользоваться первым законом термодинамики, который после дифференцирования приобретает вид:

$$\frac{dT_n}{d\tau} = \frac{1}{c_n m_n} \left[ Q - c_n T_n \Delta m F_2 - p_n \frac{dV_n}{d\tau} \right], \quad (3)$$

где  $F_2 = 4\pi R_2^2$ .

Перенос массы и теплоты через границу раздела вода-пар будем рассматривать в рамках молекулярно-кинетической теории, которая позволяет наиболее точно описывать кинетику фазовых переходов на поверхности жидкость-газ [2]. Будем считать, что температура парового объема  $T_n$

не равна температуре поверхности раздела вода-пар  $T_2$ , т.е. процесс будет происходить при наличии некоторого скачка температуры на границе раздела. Тогда интенсивность массопереноса при фазовом переходе и удельный тепловой поток между паром и поверхностью раздела вода-пар [2, 4] равны:

$$\Delta m = 0,25\alpha_m [\rho_2 U_2(T_2) - \rho_n U_n(T_n)], \quad (4)$$

$$q = 0,25\rho_n c_n U_n(T_n)(T_2 - T_n) + \Delta m c_n T_2, \quad (5)$$

где  $U(T) = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_n}}$  – среднеарифметическая скорость теплового движения молекул пара при температуре  $T$ .

Так как охлаждение воды либо ее нагрев обусловлен теплообменом с паром и передачей скрытой теплоты парообразования, то с учетом теплового потока, возникающего в результате разности температур центра капли воды  $T_1$  и температуры поверхности раздела вода-пар  $T_2$  [2, 4], можно записать:

$$\frac{2\lambda_g}{R_g}(T_1 - T_2) = q + \Delta m L(T_2). \quad (6)$$

Решение этого уравнения позволит определить неизвестную температуру  $T_2$ .

В уравнение (3) входят также неизвестные величины: масса пара  $m_n$ , его удельная теплоемкость  $c_n$ , давление  $p_n$  и объем  $V_n$ , а также количество теплоты  $Q$ .

Масса пара зависит от массового потока и определяется выражением

$$\frac{dm_n}{d\tau} = \Delta m F_2. \quad (7)$$

Объем парового слоя определяется разностью между объемом  $\frac{4}{3}\pi R_3^3$  и объемом воды  $\frac{4}{3}\pi R_2^3$ :

$$V_n = \frac{4}{3}\pi [R_3^3(\tau) - R_2^3(\tau)]. \quad (8)$$

Удельную теплоемкость будем считать постоянной величиной.

Теплота  $Q$  состоит из теплоты, которая отбирается со стороны жидкости (воды) или поступает в

нее, а также теплоты, которая поступает от масляной пленки:

$$Q = qF_2 + \frac{4\pi\lambda_m(T_4(\tau) - T_3(\tau))}{\frac{1}{R_3(\tau)} - \frac{1}{R_4(\tau)}}. \quad (9)$$

Давление пара будет зависеть как от его температуры  $T_n$ , так и от плотности  $\rho_n$ .

Принимаем для расчета уравнение состояния Редлиха-Квонга в модификации Вильсона [5], которая дает наименьшую относительную погрешность в определении  $p_n = f(T_n, \rho_n)$ . Тогда:

$$p_n = \frac{\Re T_n \rho_n}{M_n} \left[ \frac{1}{1 - \frac{b\rho_n}{M_n}} - \frac{\delta_a}{\delta_b} \frac{b}{\frac{M_n}{\rho_n} + b} F \right], \quad (10)$$

где  $F = 1 + (1,57 + 1,629)(T_r^{-1} - 1)$ ;  $\Re$  – фактор асимметрии;  $T_r = T/T_{cr}$  – приведенная температура;

$$b = \frac{\delta_b \Re T_{cr}}{\rho_{cr}}; \delta_a = 0,4275; \delta_b = 0,08664.$$

Допуская однородность  $p_n$  и  $T_n$  в паровом объеме, в следствие чего плотность паровой фазы в паровом объеме  $\rho_n$  также является однородной, т.е.  $d\rho_n/dR_n = 0$ , функцию изменения плотности пара во времени можно представить в виде

$$\frac{d\rho_n}{d\tau} = \frac{1}{V_n} \left( \frac{dm_n}{d\tau} - \rho_n \frac{dV_n}{d\tau} \right). \quad (11)$$

Подставляя найденные значения  $\rho_n$  из (11) и  $T_n$  из (3) в (10), можно определить давление пара в любой момент времени.

Тепловая задача заключается в записи уравнений энергии для масла и воды, а также граничных условий. Уравнения теплопроводности для масла и воды имеют вид:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right) - w_r \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau},$$

$$w_r = w_3 \frac{R_3^2}{r^2}, \tau > 0, R_3 < r < R_4, \quad (12)$$

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \tau > 0, \quad (13)$$

$$0 < r < R_2.$$

Начальные условия:

$$T(r, 0) = T_0, \quad 0 < r < R_4. \quad (14)$$

Граничные условия с учетом уравнения (6):

$$-\lambda_m \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_4} = \alpha(T_{\text{воз}} - T_4); T_3(\tau) = T_n;$$

$$-\lambda_b \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (15)$$

где коэффициент теплоотдачи согласно [6] равен:

$$\alpha = \lambda_{\text{воз}}/R_4. \quad (16)$$

Скорость движения границы раздела вода-пар можно найти из уравнения

$$w_2 = \frac{dR_2}{d\tau} = \frac{\Delta m}{\rho_6(T_2)}. \quad (17)$$

Толщина паровой прослойки равна:

$$\delta_n = R_3(\tau) - R_2(\tau). \quad (18)$$

Толщина пленки масла определяется выражением:

$$\delta_m = R_4(\tau) - R_3(\tau). \quad (19)$$

Критерием окончания расчета является критическая толщина масляной пленки, при которой она разрушается [6]. Уравнения (1)-(19) должны быть дополнены уравнениями зависимостей теплофизических параметров от температуры.

## Результаты расчетов

Проводим расчеты для капли эмульсии, которая состоит из капли воды радиусом  $R_2 = 99$  мкм, паровой прослойки толщиной 1 мкм и масляной

пленки толщиной  $\delta_m = 15$  мкм. В начальный момент времени эта система имеет одинаковую температуру равную  $t_0 = 180$  °С, пар является насыщенным, т.е. находится при давлении  $p_0 \approx 10^6$  Па. В некоторый момент времени данная система оказывается в зоне пониженного давления  $p_4 = 10^5$  Па и при этом нагревается воздухом с температурой  $t_{воз} = 300$  °С.

Расчеты проведены с использованием метода конечных разностей с явным выделением переменных. Результаты представлены на рис. 2-8.

Из рис. 2-8 видно появление осцилляций радиусов границ раздела, температур, давления пара, что отвечает физике реального процесса. Время до разрушения масляной пленки составляет  $\approx 1,23 \cdot 10^{-2}$  с. На рис. 2 показано изменение во времени температур поверхностей раздела вода-пар  $t_2$ , масло-воздух  $t_4$ , пара  $t_n$  и центра капли воды  $t_1$ . Видны явные осцилляции температур  $t_2, t_n, t_4$  в диапазоне времени  $\tau < 3,7 \cdot 10^{-3}$  с, причем температура пара  $t_n$  выше температуры границы раздела вода-пар, что показывает его перегретое состояние. Этот перегрев является следствием дополнительного количества теплоты, поступающей от масляной пленки в результате ее теплообмена с окружающим воздухом. В период времени  $\tau \approx (0,05...0,15) \cdot 10^{-3}$  с наблюдается наибольшая

величина перегрева, которая в свою очередь ведет к увеличению массового потока по рис. 6. В целом наблюдается согласованность в изменении температуры пара и массового потока, что указывает на немалое влияние теплового потока от пе-

Давление пара  $P_n \cdot 10^{-5}$ , Па

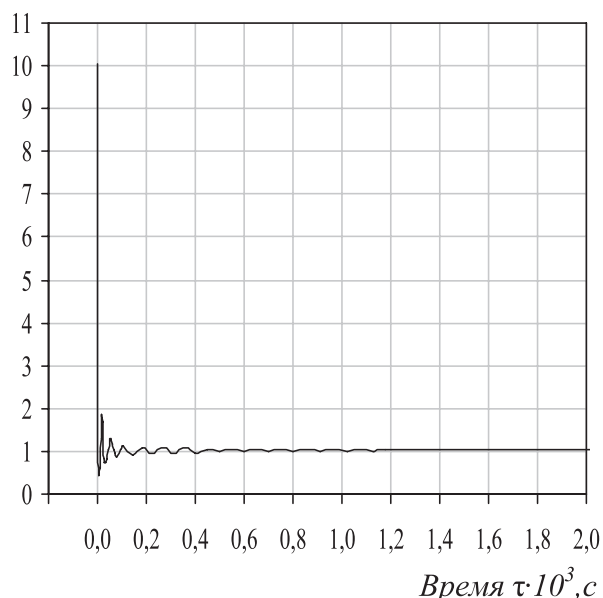


Рис. 3. Изменение давления пара во времени.

Температура, °С

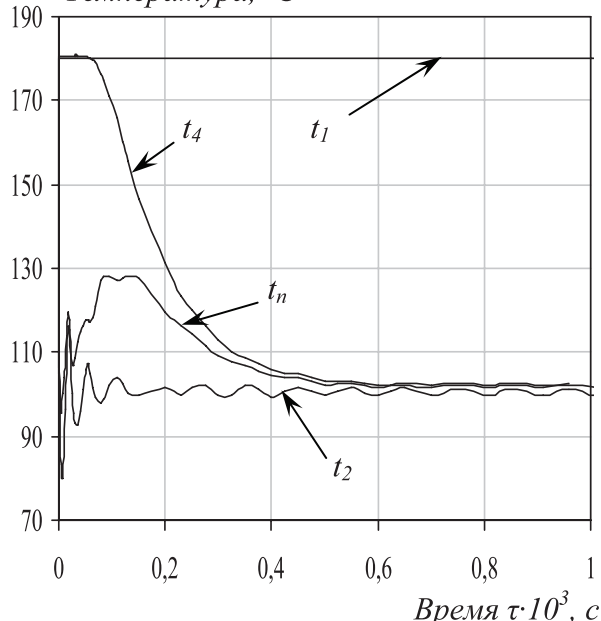


Рис. 2. Изменение температур поверхностей раздела и центра воды во времени.

Радиус  $R_2, R_3$ , мкм

Толщина паровой прослойки  $\delta_n$ , мкм

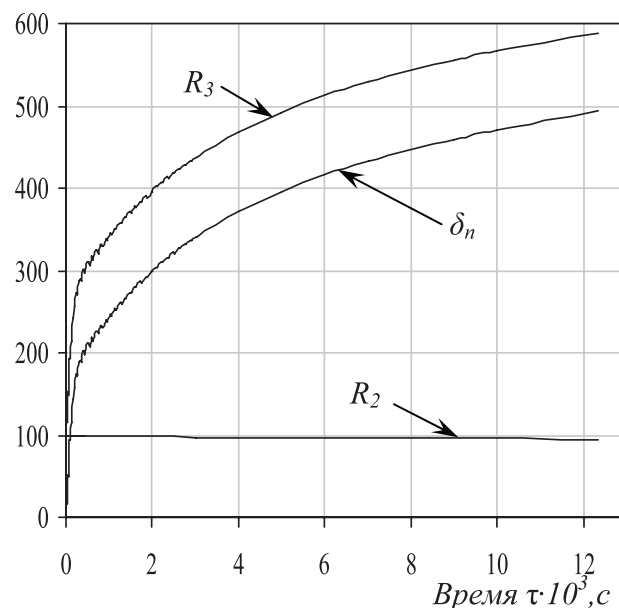


Рис. 4. Изменение радиусов границ раздела масло-пар, вода-пар и толщины паровой прослойки во времени.

регретного пара к поверхности раздела вода-пар, в результате его нагрева от пленки масла. Так снижение  $t_n$  приводит к соответствующему снижению массового потока, который, начиная с момента времени  $\tau > 4 \cdot 10^{-3}$  с, монотонно

снижается. Как видно на рис. 2, в начальный момент расширения паровой полости температура  $t_4$  незначительно возрастает, после чего происходит резкое ее снижение практически до температуры  $t_n$ . Первый пик повышения температуры па-

Толщина масляной плёнки  $\delta_m$ , мкм

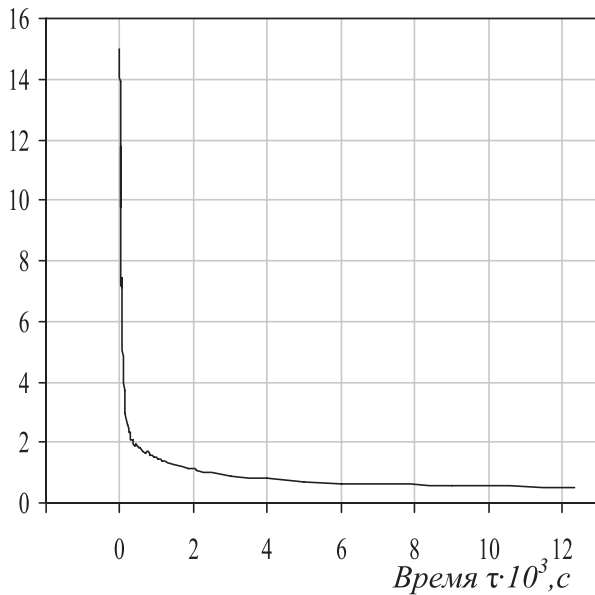


Рис. 5. Зависимость толщины пленки масла (ПАВ) от времени.

Массовый поток  $\Delta m$ , кг/(м<sup>2</sup>·с)

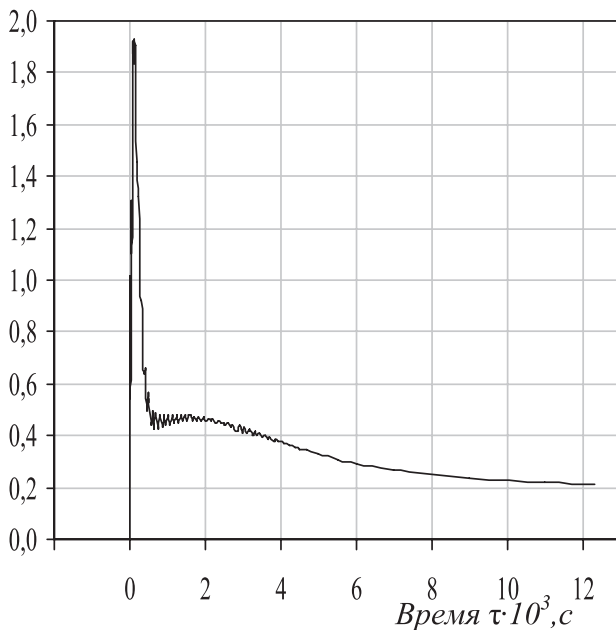


Рис. 6. Изменение во времени массового потока.

Скорость движения  $w_2 \cdot 10^4$ , м/с

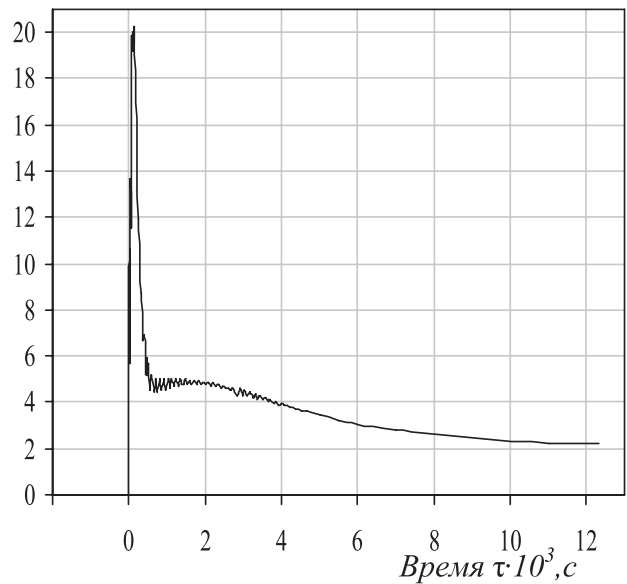


Рис. 7. Зависимость скорости движения границы раздела вода-пар от времени.

Скорость движения  $w_3$ , м/с

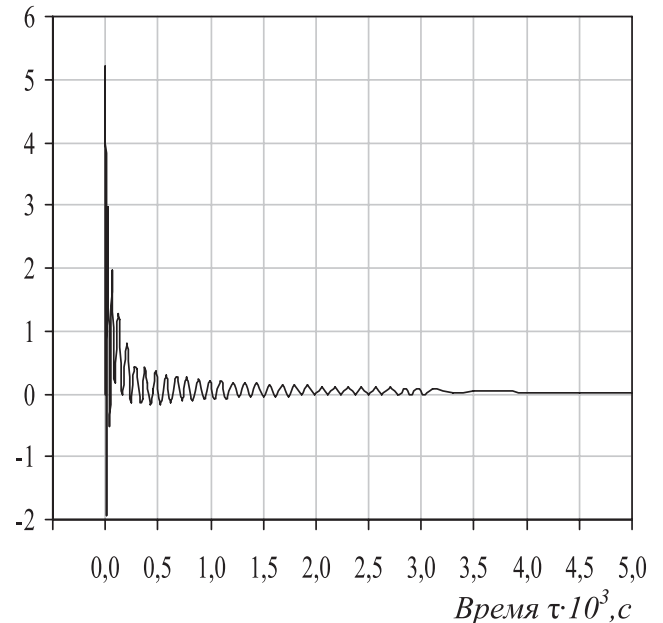


Рис. 8. Изменение скорости движения границы раздела масло-пар во времени.

ра ( $\tau \approx 0,02 \cdot 10^{-3}$  с) согласуется с резким уменьшением радиуса границы раздела масло-пар (рис. 4) и, как следствие, увеличивается толщина масляной пленки (рис. 5). Соответственно повышается и давление пара (рис. 3). Осцилляции температуры границы раздела вода-пар являются следствием соответствующих осцилляций массового потока, температуры пара и его плотности. Как показывают рис. 2-8, возникающие осцилляции температур, давления, радиусов границ раздела, скоростей движения этих границ являются затухающими колебаниями. Так, температуры  $t_2$  и  $t_n$  стремятся к определенным значениям, соответственно к  $t_2 \approx 100$  °С и  $t_n \approx 102$  °С, а после  $\tau \approx 4 \cdot 10^{-3}$  с эти колебания мало заметны. Давление пара отражает совместное действие температуры и плотности пара на дальнейшее развитие процесса, и, как видно из рис. 3, в начале роста парового объема происходит значительное снижение давления  $p_n$  до давления ниже  $p_4$ , в результате чего движение границы раздела масло-пар осуществляется в сторону уменьшения объема пара (рис. 4), что показано на рис. 8 отрицательными значениями скорости движения  $w_3$ . Такое снижение давления  $p_n$  указывает на то, что массовый поток совместно с тепловым потоком от масла к пару не в состоянии компенсировать динамический эффект расширения парового объема, который приводит к уменьшению температуры и плотности пара. Давление пара стремится к некоторому значению, которое немногим выше давления окружающей среды  $p_4$ . После установления этого определенного давления (с небольшими осцилляциями) изменение радиусов  $R_2$  и  $R_3$ , толщины масляной пленки  $\delta_m$  и парового слоя  $\delta_n$  (рис. 4, 5) происходит монотонно, а скорость движения границы раздела масло-пар  $w_3$  (рис. 8) стремится к некоторому постоянному значению. Скорость движения границы раздела вода-пар  $w_2$  (рис. 7) имеет одинаковый характер изменения во времени с массовым потоком (рис. 6), что указывает на незначительное влияние изменения плотности воды с температурой на характер протекания процесса. Температура центра капли воды  $t_1$  (рис. 2) на протяжении  $\approx 1$  мс остается постоянной и равной начальной температуре системы (инерционный период), после чего монотонно снижается, асимптотически приближаясь к температуре  $t_1$ .

## Выводы

1. Учет динамических сил играет определяющую роль в росте парового слоя и позволяет более детально и точно рассмотреть этот процесс. Используя только тепловую часть задачи роста паровой фазы [6], можно предполагать и изначально задавать температуру поверхности раздела вода-пар, а с применением молекулярно-кинетической теории и учетом динамических сил, возможно ее нахождение на каждом шаге расчета. Принципиальным отличием от результатов “чисто” тепловой задачи, в которой принималось, что пар всегда насыщен и находится при одинаковой температуре на всем промежутке роста паровой фазы, является изменение плотности пара и его перегрева. Поэтому можно сделать вывод о необходимости совместного решения как динамической, так и тепловой задачи.
2. Наибольший интерес вызывает определение теплового потока, который поступает в систему, либо отбирается от нее, с учетом изменения числа Нуссельта и динамического воздействия со стороны окружающей среды. Это может привести к преждевременному разрушению пленки масла или ПАВ при движении рассмотренной капли эмульсии в окружающей среде.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И. Теплофизические процессы в эмульсиях. — К.: Наукова думка, 2005. — 265 с.
2. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа ДИВЭ. 1. Модель динамики одиночного парового пузырька // Промышленная теплотехника. — 1995. — 17. — №5. — С. 3 — 29.
3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. — К.: Наукова думка, 1980. — 316 с.
4. Долинский А.А., Басок Б.И., Накорчевский А.И. Адиабатически вскипающие потоки. — К.: Наукова думка, 2001. — 208 с.
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. — Л.: Химия, 1982. — 592 с.
6. Павленко А.М., Климов Р.О., Басок Б.И. Розвиток методів гідротермічної гомогенізації // Промышленная теплотехника. — 2005. — 27. — №4. — С. 64 — 71.

Получено 11.07.2006 г.