

Д. В. Федасюк, д. т. н., проф.; Т. О. Муха

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООТВОДА ПРИ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ В МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

*В статье построено нестационарную нелинейную модель процесса теплообмена в микроэлектронных устройствах с использованием кипения жидкости для интенсификации теплоотвода в критических условиях. Для анализа модели использовано совокупность числовых методов, что дало возможность получить решение в числовом виде. На основании построенной модели исследовано изменение температуры и изменение потоков тепла, отводимых с поверхности устройства, во времени и воздействие процесса кипения на теплоотвод.*

**Ключевые слова:** теплообмен, кипение, нелинейная модель, числовые методы, моделирование.

### Постановка проблемы

Рост тепловыделения, который наблюдается в последние десятилетия вследствие миниатюризации электронных компонентов, накладывает ограничения на мощность и быстродействие электронных устройств, поэтому важной задачей является отвод тепла для обеспечения соответствующего температурного режима. Если же теплоотвод недостаточен для обеспечения соответствующего температурного режима, то температура устройства растет, что грозит выходом из строя. При таких критических условиях возникает потребность в дополнительном отводе тепла, которое бы позволило быстро уменьшить температуру охлаждаемого элемента.

Быстрое охлаждение обеспечивает один из современных подходов к отводу тепла, который предусматривает использование вещества в изменённом состоянии из жидкого в газообразное. При изменении агрегатного состояния вещества происходит отвод тепла в виде скрытой энергии парообразования жидкости. Такой теплоотвод характеризуется высокими коэффициентами теплоотдачи. Он включает испарение жидкости в горячей зоне и конденсацию пара в холодной зоне и обеспечивает отвод гораздо больших тепловых потоков чем те, которые отводятся в результате вынужденной конвекции воздуха или жидкости.

### Анализ исследований и публикаций

Известные исследования процесса отвода тепла с использованием испарения характеризуются широким многообразием. Однако часть исследователей сосредоточивает внимание только на процессе испарения [1 – 5], а теплообмен остается вне внимания. Другие ученые исследуют только процесс стационарного теплообмена [6 – 8], что ограничивает их использование для анализа нестационарного процесса теплообмена. Некоторые ученые при построении математических моделей делают предположения, которые существенно упрощают модель [9, 10], но это влияет на адекватность результатов.

В работе [11] построена модель процесса теплообмена с учетом влияния испарения жидкости на процесс отвода тепла. Но при построении модели делалось предположение об отсутствии кипения жидкости, и о том, что испарение происходит за счет диффузии.

Вследствие указанных особенностей возникает необходимость построения математической модели процесса теплообмена с использованием кипения жидкости для дополнительного теплоотвода при критических условиях в микроэлектронных устройствах

(МЭУ).

### Цель исследования

Целью исследования является разработка математической модели процесса теплообмена в микроэлектронных устройствах с использованием кипения жидкости для интенсификации теплоотвода в критических условиях.

### Описание задачи

Рассматривается МЭУ, конструкция которого изображена на рис. 1 [12]. На подложке установлен защищенный корпусом кристалл. Отвод тепла от МЭП в окружающую среду обеспечивает присоединенная к корпусу кристалла теплоотводящая пластина. Для улучшения теплового контакта между пластиной и корпусом находится теплопроводная паста. Когда температура корпуса превышает критическую, то на поверхность теплоотводящей пластины подается жидкость, обеспечивая в результате кипения дополнительный отвод тепла.

Для МЭУ производителями задается либо мощность тепловыделения, которая должна быть отведена [13, 14], или тепловой поток, который выделяет МЭУ. При этом температура корпуса МЭУ не должна превышать заранее заданной допустимой температуры [15]. Температура корпуса МЭУ превышает критическую в случае, когда теплоотвод недостаточен для того, чтобы рассеять тепло, которое выделяется МЭУ. Для отвода выделенного МЭУ тепла при критических условиях используется не прямое жидкостное охлаждение с использованием кипения жидкости, поскольку такой подход позволяет избегать контакта кипящей жидкости с МЭУ. В [16] показано, что использование для каждого тепловыделяющего элемента отдельной теплоотводящей пластины является самым эффективным с точки зрения теплоотвода.

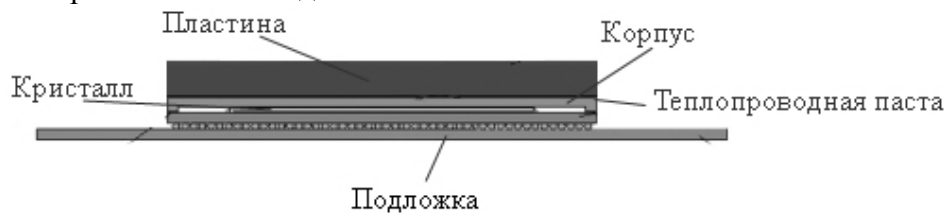


Рис. 1. Конструкция МЭУ

При моделировании учитывается два режима теплообмена: 1) при обычных условиях, когда теплоотвод происходит за счет конвекции; 2) при кипении жидкости, которая подается на поверхность при условии превышения критической температуры. Кипение жидкости обеспечивает дополнительный теплоотвод при критических условиях в МЭУ. Тепловую модель МЭУ представлено в виде бесконечной пластины (рис. 2) толщиной  $D$ . Пластину снизу нагревает поток тепла величиной  $q_0$ . Пока температура меньше критической, то тепло отводится с поверхности пластины за счет конвекции. В начальный момент времени пластина имеет однородную температуру  $T_b$ . Когда температура нижней поверхности пластины становится больше за  $T_{cr}$ , на верхнюю поверхность выливается жидкость, в результате кипения которой отводится тепло. Образованный слой жидкости имеет гораздо меньшую толщину, чем толщина пластины. Температура окружающей среды –  $T_\infty$ , атмосферное давление –  $P_{atm}$ . Коэффициент теплопроводности пластины, плотность и удельная теплоемкость зависят от температуры. При построении модели сделано предположение [17, 18], что теплообмен происходит только вдоль оси  $x$ , поскольку обычно толщина пластины намного меньше ширины и длины.

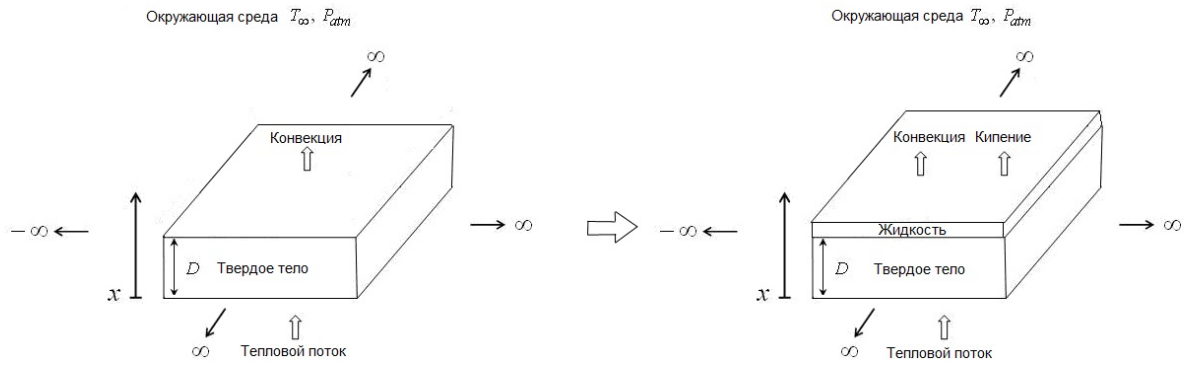


Рис. 2. Тепловая модель МЭУ

Процесс теплопроводности в обычном режиме описано следующим нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных, начальным и граничными условиями:

$$c_s(T_1)\rho_s(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$k(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -q_0'', \quad (2)$$

$$-k(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=D} = q_{conv}'', \quad (3)$$

$$T_1(x, t=0) = T_b, \quad (4)$$

где  $T_1 = T_1(x, t)$  – температура пластины в точке с координатой  $x$  в момент времени  $t$  в обычном режиме;  $k(T_1)$ ,  $c_s(T_1)$ ,  $\rho_s(T_1)$  – коэффициент теплопроводности  $[Bm/m \cdot K]$ , удельная теплоемкость  $[Дж/кг \cdot K]$  и плотность  $[кг/м^3]$  соответственно,  $q_0''$  – величина потока тепла, который передается от МЭУ к теплоотводной пластине  $[Bm/m^2]$ ,  $q_{conv}''$  – поток тепла, который отводится от поверхности за счет конвекции  $[Bm/m^2]$ ,  $T_b$  – начальная температура пластины  $[K]$ .

При использовании кипения жидкости для интенсификации теплоотвода процесс теплопроводности в критическом режиме описывается такими уравнениями:

$$c_s(T_2)\rho_s(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \right), \quad (5)$$

$$k(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = -q_0'', \quad (6)$$

$$-k(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=D} = q_{conv}'' + q_{boil}'', \quad (7)$$

$$T_1(x, t=t_{cr}) = T_2(x, t=t_{cr}), \quad (8)$$

где  $T_2 = T_2(x, t)$  – температура пластины в точке с координатой  $x$  в момент времени  $t$  при критическом режиме,  $q_{boil}''$  – поток тепла, который отводится от поверхности за счет кипения  $[Bm/m^2]$ .

Поток тепла, который отводится за счет конвекции, согласно закону Ньютона, определяется из уравнения.

$$q''_{conv} = h(T_i(D, t) - T_{\infty}), \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

где  $h$  – коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой  $[Вт/м^2 \cdot К]$ ,  $T_{\infty}$  – температура окружающей среды,  $i = 1$  для обычного режима и  $i = 2$  для критического режима.

Поток тепла, который отводится за счет кипения жидкости, определяется [17]

$$q''_{boil} = \mu_l h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left( \frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3, \quad T_2 \geq T_{boil} + 5, \quad (10)$$

где  $h_{fg}$  – удельная теплота испарения жидкости  $[Дж/кг]$ ,  $\mu_l$  – вязкость жидкости  $[кг/с \cdot м]$ ,  $g$  – ускорение свободного падения  $[м/с^2]$ ,  $\rho_l, \rho_v$  – плотность кипящего вещества в жидком и газообразном состояниях  $[кг/м^3]$  соответственно,  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости  $[Н/м]$ ,  $c_{p,l}$  – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении,  $\Delta T_e$  – разница между температурой верхней поверхности пластины и температурой кипения жидкости,  $C_{s,f}$ ,  $n$  – константы, которые определяются экспериментальным путем для каждой пары поверхность-жидкость,  $Pr_l$  – число Прандтля для жидкости.

Для анализа нелинейной нестационарной модели процесса теплообмена в МЭУ с использованием кипения использована совокупность числовых методов: для дискретизации по времени – метод Рунге, для пространственной дискретизации – метод сеток.

Особенностью применения метода сеток к нелинейной математической модели теплообмена в МЭУ с использованием кипения для интенсификации теплоотвода является необходимость использования итерационных методов для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений.

### Результаты моделирования

При моделировании использованы следующие значения входных параметров модельного эксперимента и значения теплофизических свойств материалов:

$$T_b = 293 \text{ }^0K, \quad T_{\infty} = 293 \text{ }^0K, \quad D = 0,01 \text{ м}, \quad q''_0 = 100000 \text{ } [Вт/м^2].$$

Материал теплоотводной пластины – медь:

$$k_s = 401 \text{ } [Вт/м \cdot К], \quad c_s = 8933 \text{ } [Дж/кг \cdot К], \quad \rho_s = 385 \text{ } [кг/м^3].$$

Этиловый спирт [19]:

$$h_{fg} = 846000 \text{ } [Дж/кг], \quad \mu_l = 0,000592 \text{ } [кг/с \cdot м] \text{ [20]}, \quad \rho_l = 757, \quad \rho_v = 1,44 \text{ } [кг/м^3], \\ \sigma = 0,0177 \text{ } [Н/м] \text{ [17]}, \quad c_{p,l} = 2470 \text{ } [Дж/кг \cdot К], \quad C_{s,f} = 0,0027, \quad n = 1,7, \quad Pr_l = 8,12 \text{ [21]}, \\ T_{boil} = 351 \text{ }^0K.$$

Ацетон [22]:

$$h_{fg} = 501000 \text{ } [Дж/кг], \quad \mu_l = 0,000316 \text{ } [кг/с \cdot м] \text{ [23]}, \quad \rho_l = 790, \quad \rho_v = 2,33 \text{ } [кг/м^3], \\ \sigma = 0,02346 \text{ } [Н/м], \quad c_{p,l} = 2150 \text{ } [Дж/кг \cdot К], \quad C_{s,f} = 0,013 \text{ [24]}, \quad n = 1,7, \quad Pr_l = 4,22, \\ T_{boil} = 330 \text{ }^0K.$$

FC-72 [25]:

$$h_{fg} = 88000 \text{ } [Дж/кг], \quad \mu_l = 0,00064 \text{ } [кг/с \cdot м], \quad \rho_l = 1680, \quad \rho_v = 13,55 \text{ } [кг/м^3], \quad \sigma = 0,01$$

$[H/м]$ ,  $c_{p,l} = 1100 [Дж/кг \cdot K]$ ,  $C_{s,f} = 0,0055 [26]$ ,  $n = 1,7$ ,  $Pr_l = 12,35$ ,  $T_{boil} = 329 \text{ } ^\circ K$ .

FC-87 [27]:

$h_{fg} = 103000 [Дж/кг]$ ,  $\mu_l = 0,00045 [кг/с \cdot м]$ ,  $\rho_l = 1650$ ,  $\rho_v = 11,55 [кг/м^3]$ ,  $\sigma = 0,009$

$[H/м]$ ,  $c_{p,l} = 1100 [Дж/кг \cdot K]$ ,  $C_{s,f} = 0,0055 [26]$ ,  $n = 1,7$ ,  $Pr_l = 8,84$ ,  $T_{boil} = 303 \text{ } ^\circ K$ .

Вода [17]:

$h_{fg} = 2257000 [Дж/кг]$ ,  $\mu_l = 0,000279 [кг/с \cdot м]$ ,  $\rho_l = 1044$ ,  $\rho_v = 1,679 [кг/м^3]$ ,  $\sigma = 0,0589$

$[H/м]$ ,  $c_{p,l} = 4217 [Дж/кг \cdot K]$ ,  $C_{s,f} = 0,0128$ ,  $n = 1,0$ ,  $Pr_l = 1,76$ ,  $T_{boil} = 373 \text{ } ^\circ K$ .

На рис. 3 показано изменение температуры теплоотвода на нижней поверхности во времени, поскольку на нижней поверхности пластины температура является самой высокой. В отличие от испарения, которое происходит при любой температуре, кипение жидкости возможно лишь тогда, когда температура теплоотводящей пластины становится больше температуры кипения. Поэтому жидкость подается в момент, когда температура пластины превышает температуру кипения. После этого температура пластины растет медленнее, поскольку тепло дополнительно отводится за счет кипения жидкости. Рост температуры прекращается, когда разница между температурой на верхней поверхности пластины и температурой кипения жидкости становится такой, что обеспечивает отвод необходимого потока тепла. Чем ниже температура кипения жидкости, тем меньшая температура устанавливается при использовании кипения для интенсификации теплоотвода.

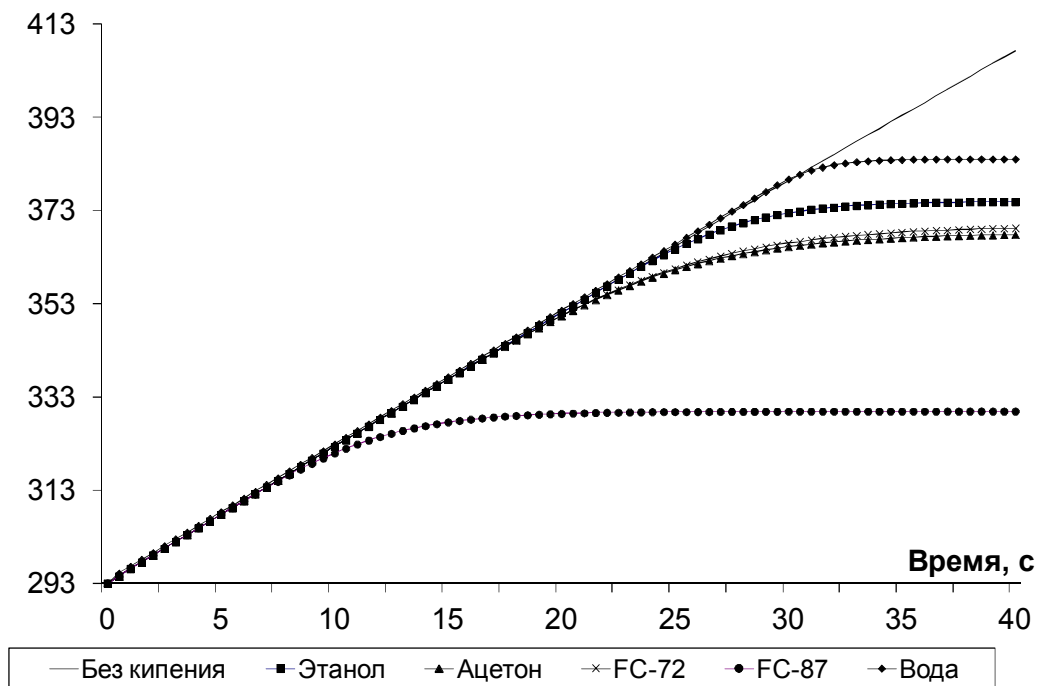


Рис. 3. Изменение температуры при использовании кипения

На рис. 4 показано изменение величин потоков тепла, отводимых теплоотводной пластиной в окружающую среду, во времени при использовании кипения различных жидкостей для интенсификации теплоотвода. До начала кипения жидкости тепло отводится за счет конвективного теплообмена между поверхностью теплоотвода и окружающим воздухом. При этом отводимые потоки тепла являются небольшими по сравнению с теми, которые отводятся при кипении жидкости. После подачи жидкости на поверхность пластины теплоотвод резко возрастает, пока не достигнет значения, которое равно величине потока тепла, выделяемого тепловыделяющим элементом.

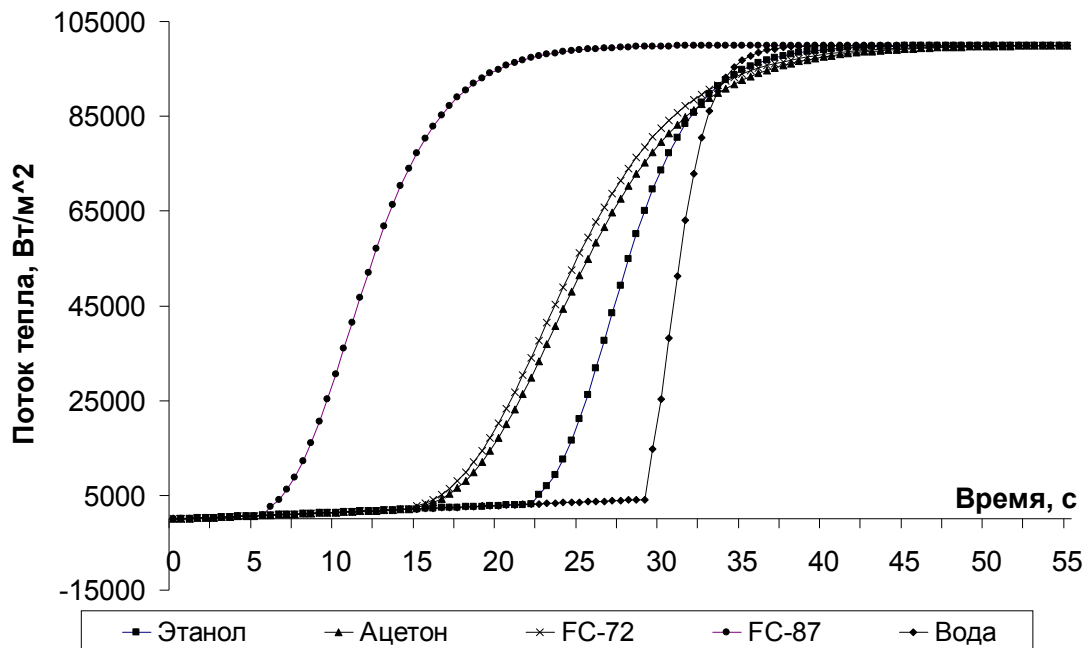


Рис. 4. Потоки, которые отводятся при кипении жидкости для дополнительного теплоотвода

Поскольку жидкость FC-87 обеспечивает наименьшую температуру среди жидкостей, используемых при исследовании, то анализ влияния величины потока  $q_0''$  на изменение температуры со временем осуществлялся с использованием этой жидкости.

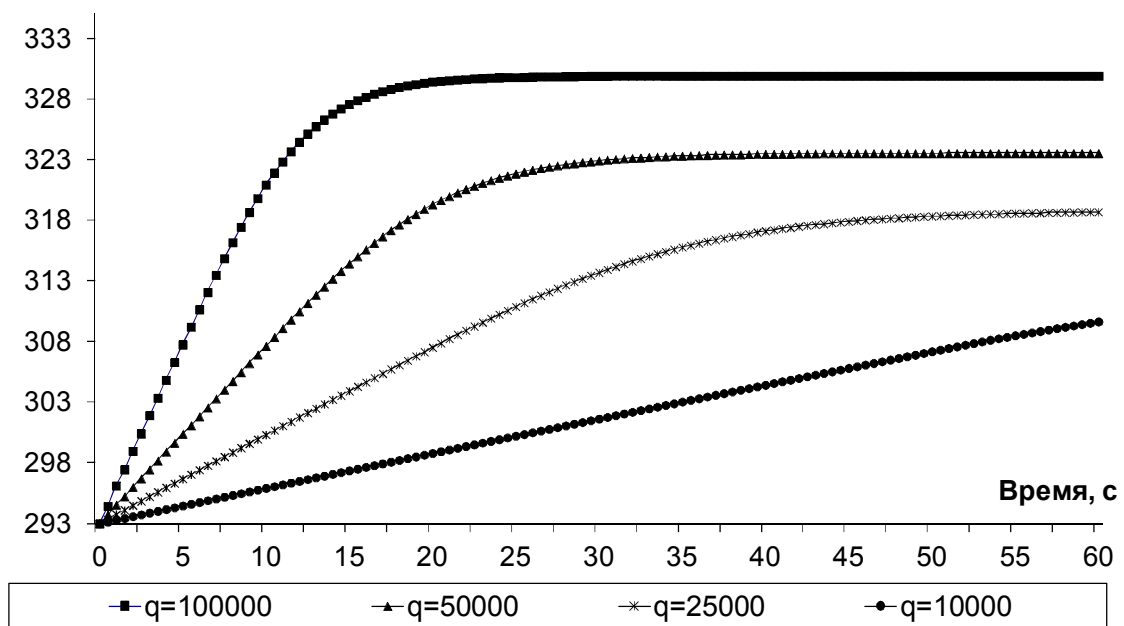


Рис. 5. Влияние потока на изменения температуры для FC-87

Чем больший поток тепла, который нагревает пластину, тем быстрее температура пластины становится равной температуре кипения. После использования кипения для интенсификации теплоотвода температура пластины становится такой, при которой поток тепла, отводимый с поверхности пластины за счет кипения и конвекции, становится равным потоку тепла, что выделяется тепловыделяющим элементом. Поэтому чем больший поток тепла, который нагревает теплоотводящую пластину, тем большая разница температур необходима при кипении, чтобы его отвести. Чем меньше величина потока  $q_0''$ , тем меньше температура пластины при уравнивании потоков, поскольку для этого необходима

меньшая разница температур.

## Выводы

Построено нелинейную нестационарную модель процесса теплообмена с использованием кипения жидкости для интенсификации теплоотвода в МЭУ при критических условиях. Модель учитывает влияние испарения жидкости во время кипения на процесс теплоотвода в критических условиях, зависимость теплофизических параметров и величины отводимого в результате кипения потока тепла от температуры. Построенная модель дала возможность исследовать изменение температуры в МЭУ и изменение потоков тепла, отводимых с поверхности МЭУ, со временем и воздействие процесса кипения на теплоотвод. Показана эффективность использования кипения жидкости для интенсификации теплоотвода при критических условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reis N. C. MRI investigation of the evaporation of embedded liquid droplets from porous surfaces under different drying regimes / N. C. Reis Jr., R. F. Griffiths, M. D. Mantle, et. al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2006. – № 49. – P. 951 – 961.
2. Reis N. C. Investigation of the evaporation of embedded liquid droplets from porous surfaces using magnetic resonance imaging / N. C. Reis Jr., R. F. Griffiths, M. D. Mantle, et. al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – № 46. – P. 1279 – 1292.
3. Gamayunov N. I. Features of vapor transfer in the evaporation of liquids from capillaries in an inhomogeneous temperature field / N. I. Gamayunov, A. A. Lankov, V. L. Malyshev // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*. – May, 1984. – № 5. – P. 65 – 70.
4. Benjamin R. J. Nucleation Site Density in Pool Boiling of Saturated Pure Liquids: Effect of Surface Microroughness and Surface and Liquid Physical Properties / R. J. Benjamin A. R. Balakrishnan // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1997. – №15. – P. 32 – 42.
5. Izmailov Y. G. Non-stationary isothermal evaporation of fluids in a cylindrical chamber / Yu. G. Izmailov, E. A. Utkin, G. P. Vyatkin // *Inzhenerno-fizicheskii Zhurnal*. – 1991. – Vol. 61, No. 5. – P. 790 – 794.
6. Komov A. T. A Physical Model for Prediction of Critical Heat Fluxes in Boiling in Swirling Subcooled Flow under Nonuniform Heating / A. T. Komov // *High Temperature*. – 2000. – Vol. 38, No. 3. – P. 502 – 506.
7. Song C. H. Cooling enhancement in an air-cooled finned heat exchanger by thin water film evaporation / Chan Ho Song, Dae-Young Lee, Sung TackRo // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – № 46. – P. 1241 – 1249.
8. Honda H. Theoretical study of evaporation heat transfer in horizontal microfin tubes: stratified flow model / H. Honda, Y. S. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – № 47. – P. 3971 – 3983.
9. Hall C. A. Semi-analytic solutions for freezing induced by evaporative cooling / Carsie A. Hall, Calvin Mackie // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2001. – № 44. – P. 1161 – 1170.
10. Kuryachii A. P. Modeling of heat and mass transfer in systems of radiation-evaporation thermal protection / A. P. Kuryachii // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2001. – Vol. 74, No. 6. – P. 1412 – 1425.
11. Федасюк Д. В. Дослідження впливу випаровування і конвекції на процес відведення тепла з поверхні пластини / Д. В. Федасюк, Т. О. Муха // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. – 2010. – № 686. – С. 255 – 264.
12. Cheng Y. Thermal analysis for indirect liquid cooled multichip module using computational fluid dynamic simulation and response surface methodology / Yingjun Cheng, Gaowei Xu, Dapeng Zhu [and other] // *IEEE transactions on components and packaging technologies*. – 2006. – vol. 29. – № 1. – P. 39 – 46.
13. Ваш источник информации по продукции Intel [Электронный ресурс] / Intel Corporation. – Режим доступа : <http://ark.intel.com/ProductCollection.aspx?series=33897>.
14. Сравнение номеров моделей и характеристик процессоров AMD Phenom [Электронный ресурс] / Advanced Micro Devices, Inc. – 2011. – Режим доступа: <http://www.amd.com/ru/products/desktop/processors/phenom-ii/Pages/phenom-ii-model-number-comparison.aspx>.
15. Федасюк Д. В. Методи та засоби теплового проектування мікроелектронних пристроїв / Д. В. Федасюк. – Львів: Видавництво Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 228 с.
16. High powered chip cooling – Air and Beyond [Электронный ресурс] / M. J. Ellsworth, R. E. Simons // *Electronics Cooling*. – August 2005. Режим доступа до журн. : <http://www.electronics-cooling.com/2005/08/high-powered-chip-cooling-air-and-beyond/>.
17. Incropera F. P. Fundamentals of heat and mass transfer / F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, Наукові праці ВНТУ, 2011, № 4

A. S. Lavine; 6th ed. – New York: John Wiley & Sons, 2007. – 925 p.

18. Heat Transfer in a Thin Plate [Электронный ресурс] / COMSOL. – Режим доступа : <http://www.comsol.com/showroom/gallery/493/>.

19. Ethanol (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH; Ethyl Alcohol) [Электронный ресурс] / MatWeb, LLC. – Режим доступа : <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=672641fab584f8e85bc873b5817c68b>.

20. Вязкость жидкостей в интервале 0–60 °C [Электронный ресурс] / ChemPort.Ru, MMII-MMXI. – Режим доступа : <http://www.chemport.ru/data/data21.shtml>

21. Ahlers G. Prandtl-Number Dependence of Heat Transport in Turbulent Rayleigh-Bénard Convection / Guenter Ahlers, Xiaochao Xu // Physical review letters. – 2001. – Vol. 86, № 15. – P. 3320 – 3323. – Режим доступа: [http://www.nsl.physics.ucsb.edu/papers/AX01\\_PRL.pdf](http://www.nsl.physics.ucsb.edu/papers/AX01_PRL.pdf).

22. Acetone (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>; 2-Propanone) [Электронный ресурс] / MatWeb, LLC. – Режим доступа : <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1f9fd4a5357e428f9a82e750f4fbbf0e>.

23. VIS (Dynamic Viscosity) Data for Acetone [Электронный ресурс] / DDBST GmbH. – Режим доступа : [http://ddbonline.ddbst.de/EE/4%20VIS%20\(Dynamic%20Viscosity\).shtml](http://ddbonline.ddbst.de/EE/4%20VIS%20(Dynamic%20Viscosity).shtml).

24. Collier J. G. Convective boiling and condensation / John G. Collier, John R. Thome; 3rd ed. – Oxford: Clarendon press, 1994. – 596 p.

25. Fluorinert Electronic Liquid FC-72. Product Information [Электронный ресурс] / Режим доступа : <http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?66666UuZjcFSLXTtnxTE5XF6EVuQEcuZgVs6EVs6E666666-->.

26. Passos J. C. Confined boiling of FC72 and FC87 on a downward facing heating copper disk / J.C. Passos, F. R. Hirata, L. F. B. Possamai, et. al. // International Journal of Heat and Fluid Flow. – Elsevier, 2004. – № 25. – P. 313 – 319.

27. Fluorinert Electronic Liquid FC-87. Product Information [Электронный ресурс] / Режим доступа : [http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UuZjcFSLXTtnxTE5x6EVuQEcuZgVs6EVs6E666666--&fn=proinfo\\_FC87.pdf](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UuZjcFSLXTtnxTE5x6EVuQEcuZgVs6EVs6E666666--&fn=proinfo_FC87.pdf).

**Федасюк Дмитрий Васильевич** – д. т. н., профессор, проректор по научно-педагогической работе, заведующий кафедрой программного обеспечения, e-mail: [fedasyuk@lp.edu.ua](mailto:fedasyuk@lp.edu.ua), тел. (032) 258-24-12.

**Муха Тарас Орестович** – ассистент кафедры программного обеспечения, e-mail: [muha\\_taras@rambler.ru](mailto:muha_taras@rambler.ru), тел. (032) 285-25-78.

Национальный университет «Львовская политехника».