

## ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА НА ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Н. Летушко, М.И. Низовцев, А.Н. Стерлягов, М.Ю. Шлюпиков

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния фильтрации воздуха на испарение капель воды с поверхности пористых материалов. В экспериментах измерялись температуры поверхности капель и их геометрические размеры в процессе испарения. Температуры поверхностей капель определялись методом ИК-термографии. В качестве пористых материалов использовались пористая медь и волокнистый полипропилен.*

*Ключевые слова: испарение, капля жидкости, пористый материал, фильтрация воздуха, пиннинг, депиннинг, ИК-термография.*

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованиям испарения капель жидкости связан с разнообразными практическими приложениями, начиная от горения топлива и интенсификации тепло-массообменных процессов до формирования наноструктур [1–3]. Исследование процесса испарения капли жидкости является классической фундаментальной задачей, и ей посвящено большое количество работ [4–7]. Однако, в процессах, связанных с испарением капель, остается еще много принципиальных вопросов, требующих более глубокого изучения. В нестационарных условиях взаимосвязанный тепло- и массоперенос в испаряющейся капле жидкости существенно осложняется влиянием фазовых переходов. Для описания динамики испарения капли кроме уравнений диффузии пара с поверхности и уравнения теплопроводности, целесообразно привлекать уравнение Навье-Стокса для описания гидродинамических потоков в капле. Аналитическое описание данных процессов достаточно сложно, а расчетные методы имеют ограничения, так как не учитывают все многообразие процессов. Для их моделирования необходимы эффективные нестационарные модели расчета. В настоящее время предложен и используется ряд физических моделей, описывающих поведение испаряющейся капли жидкости [8–11].

Помимо численного моделирования значительное внимание уделяется экспериментальным исследованиям испарения капель жидкости. В большинстве экспериментальных исследований, как правило, с помощью фото и видеоаппаратуры изучается изменение формы,

размера, радиуса кривизны капли [1, 10, 11]. Об изменении температуры капель в процессе испарения обычно получают информацию из локальных измерений с помощью контактных методов. Данный подход не дает информации о распределении температуры на поверхности и ее изменении с течением времени, что особенно важно, учитывая нестационарность процессов испарения. Весьма перспективным для экспериментального исследования испарения капель жидкости является применение тепловизионной техники [12–14].

Следует отметить, что большинство работ, посвященных испарению капель, относятся к исследованиям подвешенных капель жидкости, или лежащих на непроницаемой поверхности. В тоже время большой интерес представляют исследования испарения капель жидкостей на проницаемых поверхностях пористых материалов при фильтрации через них газов, что может внести существенные особенности в процессы тепло- и массопереноса. Вдув газа или жидкости через проницаемые пористые стенки в основной газовой поток изучался ранее для защиты рабочих поверхностей энергетического оборудования от воздействия высокотемпературных потоков газа [15, 16]. Однако в данных исследованиях изучалось формирование пристенных газовых завес и не рассматривались вопросы влияния вдува на испарение капель жидкостей на пористых поверхностях. Таким образом, экспериментальные исследования испарения капель жидкостей на поверхностях пористых материалов при фильтрации воздуха представляют научный и практический интерес при разработке энергетического оборудования.

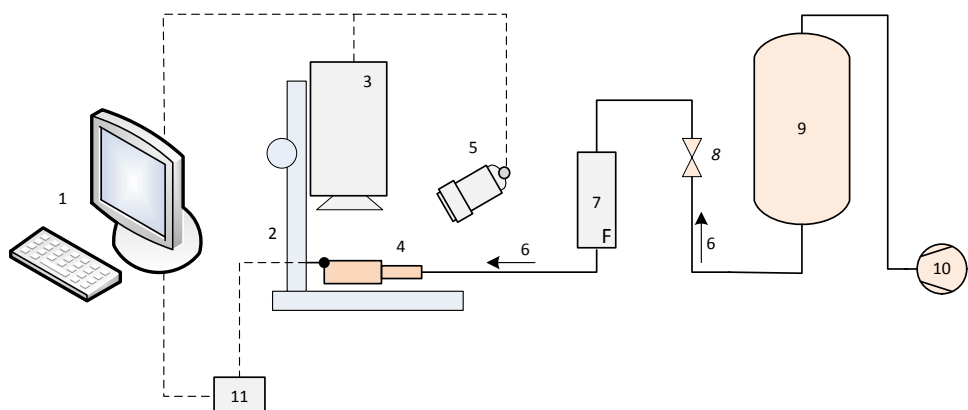


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:  
Персональный компьютер (1), штатив (2), тепловизор (3), рабочий участок (4),  
цифровой микроскоп (5), воздушный поток (6), расходомер (7), управляющий вентиль (8),  
накопительная ёмкость (9), компрессор (10), цифровой термогигрометр (11)

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для проведения экспериментальных исследований была создана установка для исследования испарения капель жидкости на поверхности пористых материалов, при фильтрации воздуха. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

Воздух, подаваемый от компрессора, при постоянной температуре поступал под пористую пластину и продувался сквозь нее в направлении снизу вверх. Исследования проводились с каплями дистиллированной воды фиксированного объема 5 мкл. Капля формировалась с помощью капельного дозатора «Thermo Scientific» с точностью 0,1 мкл. В качестве проницаемых материалов в экспериментах использовались пластины из пористой меди и волокнистого полипропилена. В течение эксперимента в процессе испарения капля методом инфракрасной термографии в различные моменты времени определялось распределение температуры на поверхности каплю. В экспериментах использовалась тепловизионная камера NEC TN 7102WV, позволяющая регистрировать распределение температуры на поверхности капли с точностью  $\pm 0,2$  °С. Измерения проводились с применением микрообъектива TN 71-377, это позволяло определять температуру с пространственным разрешением 100 мкм. В целях калибровки и для определения коэффициента излучения поверхности дополнительно выполнялись контактные измерения температуры пористой поверхности термопарой. Кроме того, процесс испарения капли воды регистрировался цифровым мик-

роскопом KS-is Digiscope II, что позволяло фиксировать изменение геометрических размеров капли в процессе испарения.

На рисунке 2 изображен рабочий участок установки, который представлял собой герметичную камеру с подводом воздуха от компрессора. На рабочем участке была закреплена термопара для измерения температуры пористой поверхности. Герметичность камеры рабочего участка обеспечивалась плотной установкой пластины из исследуемого пористого материала в верхней части камеры. Продуваемая площадь пластины  $S$  из пористого материала составляла около  $7 \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Расход подаваемого воздуха  $G$  в экспериментах варьировался от 0 до 2,5 м<sup>3</sup>/час. Таким образом, средняя по поверхности пластины скорость фильтрации воздуха  $V = G/S$  на пластине, в эксперименте изменялась от 0 до 1 м/с.

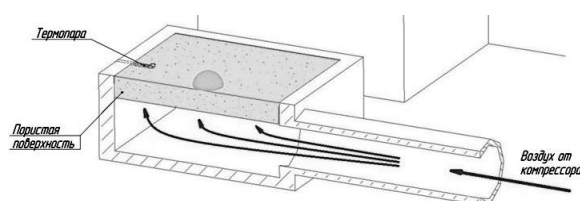


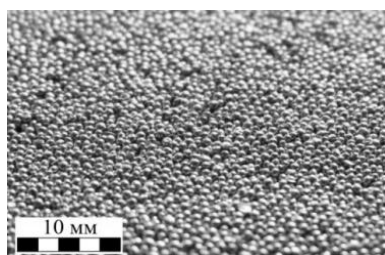
Рисунок 2 – Рабочий участок

В качестве проницаемого материала в экспериментах использовались: пористая пластина из меди (рисунок 3а) и пластина из волокнистого полипропилена (рисунок 3б).

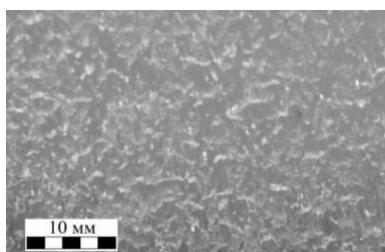
Удельный вес пластины из меди составлял 4590 кг/м<sup>3</sup>, а пластины из полипропилена – 149 кг/м<sup>3</sup>. Пористая пластина из меди

## ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА НА ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

имела толщину  $3 \times 10^{-3}$  м и общую пористость 51 % при характерном размере пор  $1 \times 10^{-4}$  м. Поверхность пластины из меди для гидрофобизации смазывалась вакуумным маслом. Пластина из волокнистого полипропилена имела толщину  $3 \times 10^{-3}$  м и общую пористость 84 % при характерном размере пор  $1 \times 10^{-3}$  м. Гидрофобизация поверхности полипропилена не проводилась.



а)



б)

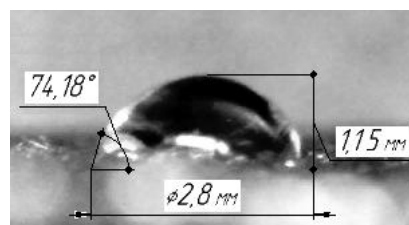
Рисунок 3 – а) пористая медь;  
б) волокнистый полипропилен

Эксперименты по испарению капель жидкости выполнялись в комнатных условиях: при постоянной температуре и влажности воздуха ( $t = 25,5$  °С,  $\phi = 40$  %). Согласно Id – диаграммы для данных условий эксперимента температура мокрого термометра (адиабатного испарения)  $t_m = 17,1$  °С. Во всех экспериментах использовали капли дистиллированной воды объемом 5 мкл и температурой  $t = 25,2$  °С.

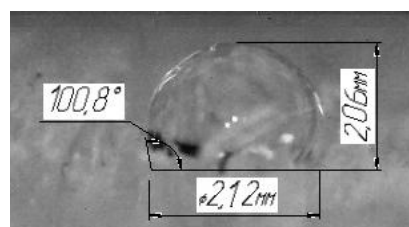
### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунке 4 представлены фотографии капель воды в начальный момент времени испарения на различных пористых поверхностях без фильтрации воздуха. Из рисунка 4 следует, что на медной поверхности капля воды из-за лучшей смачиваемости растекалась больше, чем на поверхности полипропилена. В результате на медной пластине диаметр капли был больше, а высота – меньше, чем на поверхности полипропилена. По микрофотографиям был определен объем капель в начальный момент времени. Для

рассматриваемых поверхностей он составлял 4,97 мкл, и несущественно отличался от начального объема капли 5 мкл. Таким образом, во время эксперимента капли воды находились на поверхности материала и практически не проникали внутрь используемых пористых материалов.



а)



б)

Рисунок 4 – Микрофотография капли воды в начальный момент времени без фильтрации воздуха:  
а) пористая пластина из меди,  
б) пластина из волокнистого полипропилена

На основании выполненных микрофотографий капли с течением времени было получено изменение геометрических параметров испаряющейся капли воды, лежащей на пластине из пористой меди, при различной скорости фильтрации воздуха (рисунок 5).

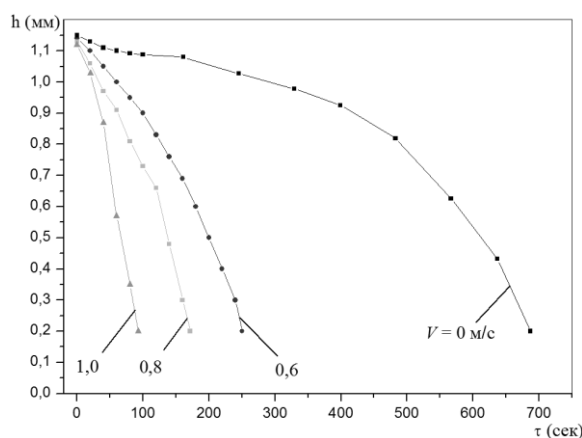


Рисунок 5 – Изменение высоты капли, испаряющейся на медной пористой пластине при различной скорости фильтрации воздуха

Из анализа данных, представленных на рисунке 5, следует, что высота капли уменьшалась в течение всего процесса испарения. С ростом скорости фильтрации воздуха темп изменения высоты капли резко возрастал, что приводило к сокращению времени испарения капли. Определение высоты капли с помощью микрофотографий было ограничено минимальным размером  $2 \times 10^{-4}$  м, что было связано с возможностями используемого оборудования.

Приведенные данные на рисунке 6 показывают, что диаметр капли оставался практически неизменным на всем этапе испарения, особенно хорошо это видно при отсутствии фильтрации. При увеличении скорости фильтрации сокращалось время испарения капли, но диаметр капли в течение основного времени испарения капли не изменялся. Таким образом, при испарении капли воды на пористой медной поверхности реализовался режим испарения капле при постоянной контактной линии – режим пиннинга [3, 6]. Пиннинг при испарении наблюдается у капель жидкости на поверхности при хорошей смачиваемости поверхности материала.

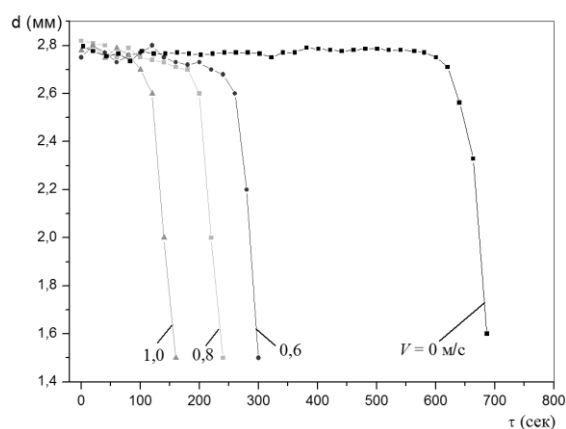


Рисунок 6 – Изменение диаметра капли, испаряющейся на медной пористой пластине при различной скорости фильтрации воздуха

Аналогичные зависимости изменения геометрических размеров были получены для испаряющихся капель воды, лежащих на пластине из волокнистого полипропилена. Полученные данные показали, что в процессе испарения высота капли также уменьшалась. Однако, в данном случае наблюдалось постепенное уменьшение диаметра капли воды. Таким образом, при испарении капли воды на пластине из волокнистого полипропилена реализовался режим испарения, при котором происходило движение контактной линии к центру капли до ее полного испарения – ре-

жим депиннинга [3, 6]. Такой режим испарения капле на поверхности характерен при плохой смачиваемости капле жидкости поверхности материала.

С применением метода ИК-термографии был проведен цикл экспериментов по исследованию испарения капле воды на поверхностях пористых материалов, при фильтрации через них воздуха с различной скоростью. В экспериментах с помощью тепловизионной камеры фиксировалось распределение температуры в различные моменты времени. В качестве примера на рисунке 7 представлены характерные термограммы поверхности капле на пористой пластине из меди и на пластине из волокнистого полипропилена через 1 минуту после начала эксперимента без фильтрации воздуха.

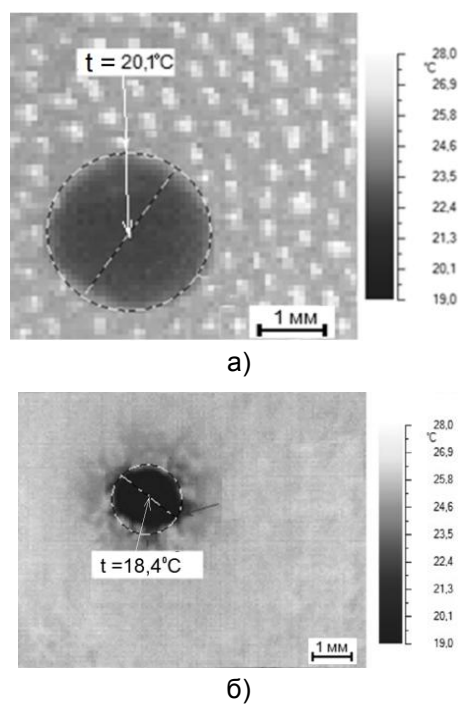


Рисунок 7 – Температура поверхности капле без фильтрации воздуха через 1 минуту с начала эксперимента: а) на пористой пластине из меди, б) на пластине из волокнистого полипропилена

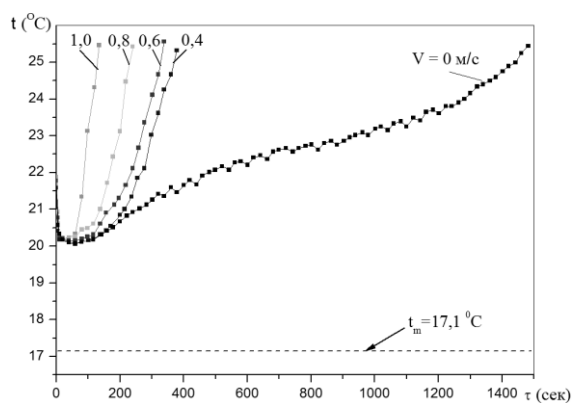
Из рисунка 7 следует, что температуры поверхностей капле были ниже температур поверхностей материалов, это обусловлено охлаждением капле вследствие процесса испарения. Распределение температуры на поверхности капле неравномерное и изменялось с течением времени, что существенно усложняло анализ процессов теплообмена.

Поэтому в качестве количественного критерия была выбрана средняя температура

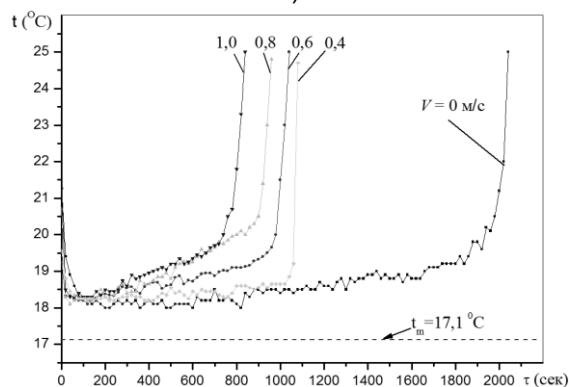
## ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА НА ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

поверхности капли. Так, на представленных термограммах видно, что средняя температура поверхности капли для пластины из меди составляла 20,1 °С, а на пластине из волокнистого полипропилена 18,4 °С.

На основании выполненных экспериментов были получены зависимости изменения с течением времени средней температуры поверхности капли, лежащей на пористой пластине из меди, при различной скорости фильтрации воздуха (рисунок 8а).



а)



б)

Рисунок 8 – Изменение средней температуры поверхности капли при различной скорости фильтрации воздуха

- а) на пористой пластине из меди,
- б) на пластине из волокнистого полипропилена

Были проведены аналогичные эксперименты по испарению капель воды на поверхности пластины из волокнистого полипропилена при фильтрации воздуха (рисунок 8б). Представленные на рисунке 8 результаты показывают, что в начальный период времени во всех экспериментах температура капель резко снижалась, это было обусловлено процессами испарения. При этом температура поверхностей капель не достигала темпе-

ратуры адиабатного испарения 17,1 °С, что вероятно было связано с подводом тепла к каплям от поверхности материалов. В дальнейшем при отсутствии фильтрации воздуха наблюдалось постепенное повышение температуры капель до их полного испарения. При наличии фильтрации происходил более быстрый рост температуры капель, и существенно снижалось время их испарения, причем, чем больше была скорость фильтрации воздуха, тем меньше было время испарения.

Для анализа изменения температуры поверхности капель с течением времени на различных пористых поверхностях рассмотрим в сравнении полученные данные для различных материалов (рисунок 9).

Результаты на рисунке 9а показывают, что без фильтрации воздуха на пористой пластине из меди понижение температуры капли в начальный период достигало 20 °С, а на пластине из волокнистого полипропилена – 18 °С. Такая разница в понижении температур капель, очевидно, связана с тем, что теплопроводность меди существенно больше теплопроводности полипропилена, и поэтому подвод тепла к капле на пластине из меди осуществлялся более интенсивно. По этой же причине последующее повышение температуры поверхности капли на пластине из полипропилена происходило более медленно, чем на пластине из меди. Капля на поверхности полипропилена испарялась медленнее (время испарения 2050 с), чем на поверхности пористой пластины из меди (время испарения 1480 с.).

При скорости фильтрации  $V = 1$  м/с (рисунок 9б) процесс изменения температуры поверхности капли качественно был аналогичен процессу без фильтрации. В начальный период температура поверхности капли на медной пластине была выше, чем на пластине из полипропилена и не достигала температуры адиабатного испарения. Можно также отметить, что при наличии фильтрации воздуха капля на поверхности полипропилена также как и без фильтрации испарялась медленнее, чем на поверхности медной пластины. По сравнению со случаем без фильтрации наблюдалось снижение времени испарения капли, как для поверхности полипропилена (время испарения 840 с.), так и для поверхности медной пластины (время испарения 130 с.).

Таким образом, фильтрация воздуха интенсифицировала процессы испарения на поверхностях пористых материалов.

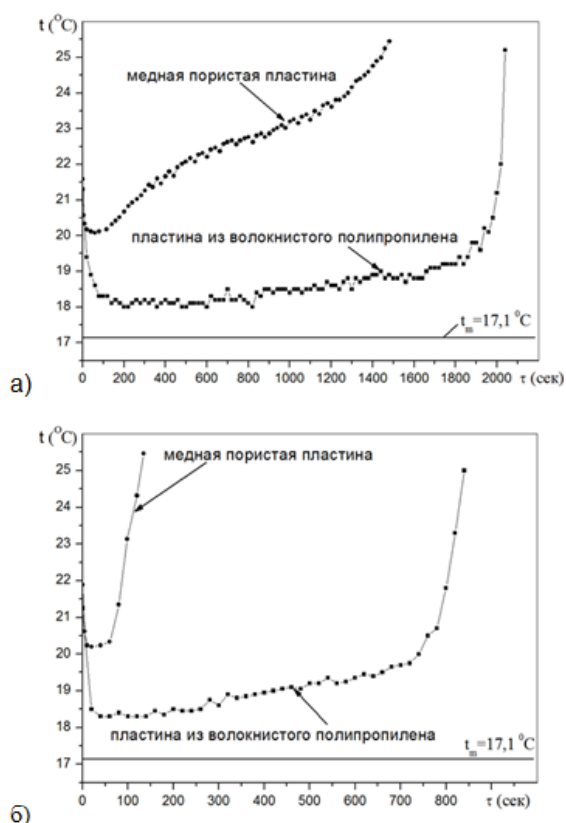


Рисунок 9 – Изменение средней температуры поверхности капли на поверхностях пористых материалов: а) без фильтрации, б) при скорости фильтрации 1 м/с

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных экспериментальных исследований определено влияние фильтрации воздуха через пористые материалы на испарение капель воды с их поверхностей. На основании полученных микрофотографий выполнен анализ изменения геометрических параметров испаряющихся капель с течением времени. Результаты анализа показали, что испарение капель воды на пористой медной поверхности проходило в режиме пиннинга, при этом контактная линия капели оставалась постоянной. Испарение капель воды на пластине из полипропилена проходило в режиме депиннинга, при этом контактная линия перемещалась.

С применением бесконтактного метода инфракрасной термографии исследована эволюция тепловых полей поверхностей испаряющихся капель воды на поверхностях пористых материалов при различных скоростях фильтрации воздуха. По результатам термографических измерений получены временные зависимости средних температур

поверхностей капель в процессе испарения. В экспериментах обнаружено существенное понижение температуры поверхностей капель на начальном этапе испарения. Во всех экспериментах наименьшее значение температуры поверхности капель превышало температуру адиабатного испарения, что было связано с подводом тепла от поверхности материала. Наименьшее значение температур поверхностей капель при испарении для разных пористых материалов отличалось, что было обусловлено различными коэффициентами теплопроводности и соответственно различной интенсивностью подвода тепла. Полученные данные показали, что испарение капель воды на пластине из полипропилена проходило медленнее, чем на пористой пластине из меди при одинаковых скоростях фильтрации воздуха. При увеличении скорости фильтрации время испарения капель уменьшалось, как на пористой медной поверхности, так и на поверхности волокнистого полипропилена. Изменением скорости фильтрации воздуха через пористые материалы можно эффективно регулировать время испарения капель на их поверхностях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-00687).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gan, Y. Evaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles under natural and forced convections / Y. Gan, L. Qiao // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2011. – Vol. 54. – P. 4913–22.
2. Назаров, А. Д. Влияние спутного газового потока в импульсивном аэрозоле на процесс испарительного охлаждения / А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, В. И. Терехов // *ТВТ.* – 2014. – Т. 52, № 4. – С. 576–579.
3. Лебедев-Степанов, П. В. Моделирование самосборки ансамблей микро- и наночастиц в испаряющейся микрокапле раствора / П. В. Лебедев-Степанов, С. П. Молчанов, М. В. Алфимов, Р. М. Кадушников, Н. И. Рубин, Н. А. Штуркин // *Российские нанотехнологии.* – 2011. – № 1-2. – С. 79–87.
4. Spalding, D. B. *Some Fundamentals of Combustion* / D. B. Spalding. – London : Pergamon, 1956. – 148 p.
5. Fuchs, N. A. *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media* / N. A. Fuchs. – London : Pergamon, 1959.
6. Seinfeld, J. H. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate* / J. H. Seinfeld, S. N. Pandis. – New York : J. Wiley, 2006.
7. Pruppacher, H. R. *Microphysics of Clouds and Precipitation* / H. R. Pruppacher, J. D. Klett. – New York : Springer, 2010.
8. Zhang, H. Q. Effects of temporally varying liquid-phase mass diffusivity in multicomponent droplet gasification / H. Q. Zhang, C. K. Law // *Combust.*

## ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА НА ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Flame. – 2008. – Vol. 153. – P. 593–602.

9. Barash, L. Y. Evaporation and fluid dynamics of a sessile drop of capillary size / L. Y. Barash, T. P. Bigioni, V. M. Vinokur, L. N. Shchur // Phys. Rev. E 79 046301 (2009).

10. Watanabe, H. An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet / H. Watanabe, Y. Suzuki, T. Harada, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 806–813.

11. Yang, J. R. An experimental and theoretical study of the effects of heat conduction through the support fiber on the evaporation of a droplet in a weakly convective flow / J. R. Yang, S. C. Wong // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. – P. 4589–98.

12. Brutin, D. Evaporation of ethanol drops on a heated substrate under microgravity conditions microgravity / D. Brutin, Z. Q. Zhu, O. Rahli, J. C. Xie, Q. S. Liu, L. Tadrist // Sci. Technol. – 2010. – Vol. 22. – P. 387–395.

13. Terekhov, V. I. Heat and mass transfer in disperse and porous media experimental and numerical investigations of nonstationary evaporation of liquid droplets / V. I. Terekhov, V. V. Terekhov, N. E. Shishkin, K. Ch. Bi // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2010. – Vol. 83, № 5. – P. 883–890

14. Яхно, Т. А. Термографическое исследование динамики температурного поля на границе жидкость – воздух в каплях водных растворов, высыхающих на стеклянной подложке / Т. А. Яхно, О. А. Санина, М. Г. Воловик, А. Г. Санин, В. Г. Яхно // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, вып. 7. – С. 22–29.

15. Леонтьев, А. И. Тепловая защита стенок плазмотронов. Низкотемпературная плазма. Т.15 / А. И. Леонтьев, Э. П. Волчков, В. П. Лебедев и др. – Новосибирск : Наука СО, 1995. – 335 с.

16. Волчков, Э. П. Пристенные газовые завесы / Э. П. Волчков. – Новосибирск : Наука, 1983. – 241 с.

**Низовцев Михаил Иванович**, д.т.н., заведующий лабораторией проблем энергосбережения ИТ СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1, e-mail: nizovtsev@itp.nsc.ru.

**Стерлягов Алексей Николаевич**, к.т.н., старший научный сотрудник ИТ СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1, e-mail: sterlyagov@itp.nsc.ru.

**Летушко Владимир Николаевич**, ведущий инженер ИТ СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1, e-mail: lvn321@yandex.ru.

**Шлюпиков Михаил Юрьевич**, студент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: bloode@gmail.com.