

4. Янюшкин А. С., Шоркин В. С. Роль адгезии и диффузии в процессе засаливания алмазных кругов на металлической связке // Справ. Инж. журн. 2007. №7. С.32-40.

5. Свойства элементов : справ. Ч. 1. Физические свойства. М.: Metallurgy, 1976. 600 с.

6. Физико-химические свойства окислов : справ. / под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgy, 1978. 472 с.

УДК 533.244

В.Н. Федяева

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В КАНАЛАХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Выполнено исследование структуры неизометрического и неоднородного пограничных слоев по определению влияния пористости материалов на интенсивность испарения различных жидкостей. При локальном зондировании лазерным пучком в пограничном слое в зоне испарения обнаружены мельчайшие частицы жидкости и дополнительный сток теплоты при их объемном испарении.

Ключевые слова: теплообмен, каналы технологических установок, теплоотдача, интенсивность испарения, капиллярно-пористые тела, эксперимент, лазер, аэродинамическая установка, структура неизометрических и неоднородных пограничных слоев.

Долгосрочная энергетическая политика Российской Федерации нацелена на повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и создание необходимых условий для перехода экономики страны на энергосберегающий путь развития [1].

Теория тепло- и массопереноса является научной основой многих теплоэнергетических процессов и включает в себя комплекс научных знаний из различных областей. Как правило, при переносе тепла и массы вещества существует их неразрывная связь. Для уточнения и дополнения методик расчета течения и теплообмена в каналах и рабочих камерах теплотехнологических установок с конвективным теплоподводом, процессы в которых нередко осложнены наличием инородных потоков массы с поверхностей капиллярно-пористых материалов, необходимо проводить экспериментальные исследования.

Широкое применение дифференциальных уравнений внутреннего тепло- и мас-

сопереноса в пористых телах [1] ограничивается отсутствием коэффициентов, учитывающих реальную кинетику процессов, в частности, многомерных неравномерных полей изменяющихся физических величин: вид материала, его структура и пористость, начальное влагосодержание и др. Предложенная в работе [2] модель поверхностного испарения и универсальные граничные условия учитывают снижение движущей силы внешнего массопереноса при варьировании интенсивности испарения и поверхностного влагосодержания.

Для повышения достоверности проектирования конвективных сушильных установок необходимы углубленные исследования по влиянию различных факторов на интенсивность внешнего теплообмена. Отрывочные и противоречивые опытные данные [3-5] по влиянию поровой структуры сушеного материала и физических свойств испаряемой жидкости, а также существенные отличия в значениях коэффициентов теплоотдачи при испарении

из капиллярно-пористых тел и при вдуве в пограничный слой инертного газа, вызывают необходимость более детального изучения физики происходящих при этом процессов.

Для исследования структуры неизо-термических и неоднородных пограничных слоев в сложных газодинамических условиях была разработана и изготовлена универсальная аэродинамическая установка открытого типа, работающая на нагнетание [6].

При скорости основного воздушного потока $W = 10$ м/с над поверхностью пластины устанавливался развитый турбулентный пограничный слой (число Рейнольдса $Re = 3,5 \cdot 10^5$). Степень турбулентности при измерениях составляла $\varepsilon = 3,5$ %, режим течения безградиентный. Температура набегающего потока варьировалась от 15 °С до 140 °С. В качестве испаряемых жидкостей для подпитки теплоизолированного участка размером $240 \times 52 \times 20$ мм³ с различными пористыми структурами (керамика, поролон) использовались вода, этиловый спирт и ацетон. Для измерения усредненных характеристик динамического и теплового пограничных слоев по длине участка испарения применялись термоанемометр отечественного производства, работающий в режиме постоянной температуры, а также миниатюрные щелевые насадки полного давления и хромель-копелевые термопары.

Анализ измерения профилей скорости в пограничном слое показал, что с ростом интенсивности испарения за счет увеличения температурного напора (рис. 1), как и при вдувах воздуха по нормали с малой интенсивностью (параметр вдува $F \cdot 10^2 = 0,003 \div 0,02$), наблюдается снижение заполненности профилей скорости за счет роста поперечного потока массы с поверхности. Причем, величина коэффициента теплоотдачи значительно выше (почти в 1,5 раза) в начальном сечении капиллярно-пористого тела и по мере его прогревания понижается по длине тела. Это должно вести к снижению коэффи-

циента теплоотдачи, что, однако не подтверждается приведенными данными и объясняется, в частности, наличием в пограничном слое дополнительного стока тепла при выносе с поверхности мельчайших частиц жидкости и их объемном испарении.

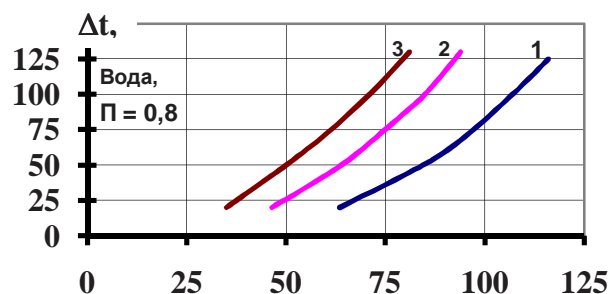


Рис. 1. Изменение коэффициента теплоотдачи α для воды по длине капиллярно-пористого тела в 1, 2 и 3 сечениях при варьировании температурным напором Δt .

Как показали проведенные исследования, существуют отличия в значениях коэффициентов теплоотдачи, определяемых при испарении из капиллярно-пористых тел и при вдуве в пограничный слой инертного газа.

Для диагностики пограничного слоя в зоне испарения методом оптического локального зондирования, основанным на отклонении зондирующего лазерного излучения на оптических неоднородностях, использовался лазер ЛНГ-203 в комплекте с анализирующей аппаратурой – измерительным комплексом фирмы «Брюль и Кьер» (Бельгия). Анализатор этой же фирмы типа 2034 имеет 800 полос спектра равной ширины и позволяет обрабатывать сигнал в диапазоне частот от 0 до 51,2 кГц. Ширина одной полосы в выбранном диапазоне частот составляла 64 Гц.

Физическую основу выбранного после анализа литературы [7], [8] оптического метода зондирования неоднородных потоков составляют явления, определяемые различным воздействием на зондирующее лазерное излучение характеристик (показатель преломления, линейный размер) оптических неоднородностей. При прохождении лазерного пучка через оп-

тическую неоднородность происходит его отклонение от первоначального направления [9].

Для проверки данного предположения на этой же аэродинамической установке у поверхности испарения (этиловый спирт) проведено локальное зондирование лазерным пучком в третьем сечении в двух точках на расстоянии 1 и 8 мм от поверхности тела. В результате измерения в зоне испарения обнаружены неоднородности размером порядка 8,4 мкм. В объеме перетяжки лазерного пучка диаметром 50 мкм их содержалось 7 штук. При определении абсолютной спектральной плотности колебаний лазерного пучка оказалось, что в диапазоне температур $20 \div 45 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит резкое увеличение скорости «уноса» частиц в поток (рис. 2).

Измеренный временной сигнал подвергался преобразованию Фурье [10], в результате которого он превращался в амплитудочастотную характеристику.

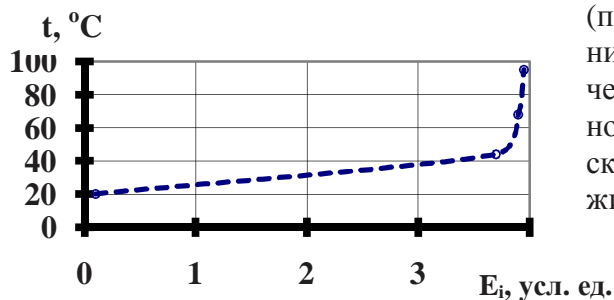


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности энергии колебаний E_i лазерного пучка от температуры ядра потока.

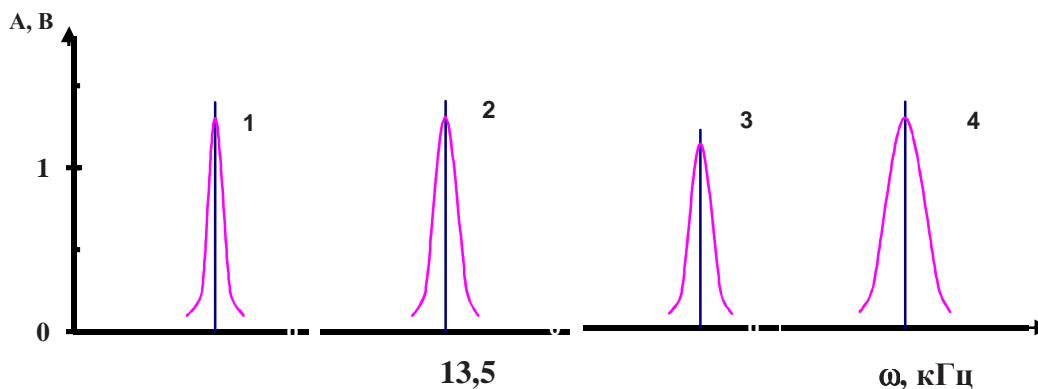


Рис. 3. Спектрограмма процесса колебаний пульсаций интенсивности лазерного зондирующего пучка от температуры ядра потока: 1 – $20 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $45 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $70 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $95 \text{ }^\circ\text{C}$.

По результатам полученных экспериментально характеристик очевидно, что имеет место отрыв с поверхности частиц-рассеивателей. Процесс уноса капель характеризуется узким спектральным пиком на спектрограмме в диапазоне частот порядка 26 кГц. При тестировании эксперимента, т. е. при наличии потока теплоносителя, наличии градиентов температур, но при «сухом» капиллярно-пористом теле, отмеченных выше характерных пиков не наблюдалось.

Вид автокорреляционной функции, также полученной при исследованиях, говорит о том, что характеристики усредненного потока не влияют на спектр пульсаций, связанных с прохождением частиц-рассеивателей через измерительный объем лазерной перетяжки.

Как и следовало ожидать, величина коэффициента теплоотдачи для воды в начальном сечении (40 мм) капиллярно-пористого материала значительно выше (почти в 1,5 раза) и по мере его прогрева понижается по длине тела (третье сечение – 200 мм), а с ростом температурного напора от $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $120 \text{ }^\circ\text{C}$ практически удваивается для всех исследуемых жидкостей.

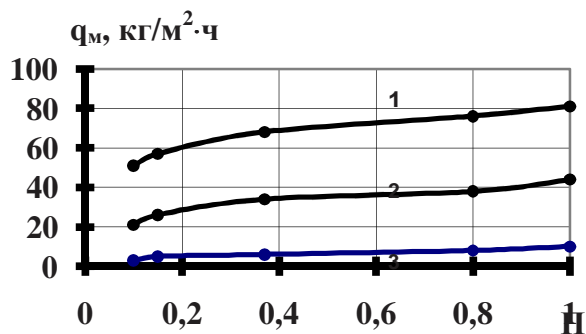


Рис. 4. Влияние пористости материала на интенсивность испарения при температуре 100 °С различных жидкостей: 1 – ацетона; 2 – спирта; 3 – воды.

Исследование влияния на интенсивность испарения пористости влажного тела показало, что наиболее заметное влияние (рис. 4) пористость материала оказывает при высоких температурах потока ($t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), причем наблюдается устойчивая тенденция к увеличению последней с ростом пористости. Величина коэффициента теплоотдачи снижается почти вдвое ($t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) при изменении пористости от 0,8 до 0,17.

Литература

1. Данилов О. Л., Федяева В. Н. Теплообменное оборудование предприятий. Вторичные энергоресурсы : учеб.-метод. пособие. Братск : БрГУ, 2005. 118 с.

2. Федяев А. А., Данилов О. Л., Коновальцев С. И. Математическая модель для энергетической оптимизации конвективных сушильных установок // Тр. 1-й Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». В 4 т. М.: МГАУ, 2002. Т. 2 С. 106 – 109.

3. Вайнберг Р. Ш. Конвективный тепло- и массообмен при неадиабатическом испарении легколетучих жидкостей из пористой пластины // ИФЖ. 1967. Т. XIII, № 4. С. 51-58.

4. Данилов О. Л., Смагин В. В. Тепло-массообмен в капиллярно-пористых телах. Минск, 1984. Вып. 7, Т.6. С. 146-149.

5. Лыков А. В., Васильев Г. В. Исследование тепло- и массообмена при испарении жидкости из капиллярно-пористого тела // ИФЖ. 1968. Т. XIV. № 3.

6. Федяев А. А., Данилов О. Л. Оптическое локальное зондирование неоднородного пограничного слоя в зоне испарения // Тр. Брат. гос. техн. ун-та. Братск, 2002. Т.2. С. 132 – 135.

7. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс В. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 122 с.

8. Когерентно-оптические доплеровские устройства в гидроаэродинамическом эксперименте : сб. ст. / Новосибирск : ИАЭ СО АН СССР, 1975. 152 с.

9. Спассков В. М., Устинов А. К. Применение метода лазерной микрорефрактометрии для исследования температурных полей в неизотермических потоках жидкостей // Тр. Моск. энергетического ин-та. М., 1988. № 191. С. 64-69.

10. Дженкис Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. Вып. 2. 288 с.

Федяев А.А., Федяева В.Н. Особенности тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах. Тр. 1-й Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». В 4 т. М.:МГАУ, 2002. Т. 2. С. 62-65.