

связано с доминированием кондуктивного механизма передачи энергии в области  $1,05 < \gamma < 1,1$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-7538.2016.8.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ait-taleb T., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfers by conduction, natural convection and radiation in hollow structures heated from below or above // Int J Therm Sci. – 2008. – Т. 47. – С. 378 – 387.
2. Anil Kumar Sharma, Velusamy K., Balaji C. Interaction of turbulent natural convection and surface thermal radiation in inclined square enclosures // Heat Mass Transfer. – 2008. – Т. 44. – С. 1153 – 1170.
3. Cherifi M., Laouar-Meftah S., Benbrik A., Lemonnier D., Saury D. Interaction of radiation with double-diffusive natural convection in a three-dimensional cubic cavity filled with a non-gray gas mixture in cooperating cases // Numer Heat Tr A Appl. – 2015. – Т. 69. – С. 479 – 496.
4. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source // Int J Heat Mass Transf. – 2014. – Т. 73. – С. 340 – 353.

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХВОЙНОЙ БИОМАССЫ НА ПРОЦЕСС СУШКИ**

Н.А. Иванова

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа А7-11

В результате обработки древесины и лесозаготовок появляется достаточное количество отходов, использование которых минимально, а их утилизация связана с большими финансовыми затратами [1]. Вместо этого биомассу можно использовать с целью получения из нее более ценных сортов топлива - твердого, жидкого или газообразного, которое сжигается с высоким коэффициентом полезного действия и при минимальном загрязнении окружающей среды [2].

Процесс удаления влаги из древесной биомассы длителен и энергозатратен, поэтому анализ закономерностей процессов влагоудаления является одной из основных задач при разработке технологий сжигания древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов [3].

### **Методика эксперимента**

Эксперимент проводился в сушильном шкафу типа SU 32. Нагрев рабочей камеры в сушильном шкафу обеспечивался проволочными нагревателями, размещенными вокруг камеры нагрева.

В эксперименте использовалась биомасса четырех образцов хвойных пород древесины, которые наиболее распространены на территории Сибири: сосна, ель, кедр, пихта.

Эксперимент осуществлялся в несколько этапов:

- подготовка образца древесины массой 100 грамм;
- взвешивание емкости, используемой для сушки, с помощью лабораторных весов;
- заполнение емкости исследуемым образцом биомассы;
- с помощью электроконтактного термометра устанавливалась необходимая температура в сушильной камере;
- ёмкость с биомассой помещалась в сушильную камеру на заранее выбранный интервал времени (10 минут);
- по истечению необходимого времени проводилось изъятие ёмкости и измерение её массы;
- анализ полученных результатов [4].

Каждый эксперимент при фиксированных условиях проводился 3 раза для выбранного диапазона температур в печи в одном и том же интервале времени.

### **Результаты**

Основной задачей исследования является определение парциального давления и коэффициента аккомодации на поверхности испарения исследуемых образцов. Используя уравнение состояния и уравнение Герца-Кнудсена, а также зная массовую скорость испарения жидкости, найденную экспериментальным путем, были получены значения парциального давления и коэффициента аккомодации для каждого образца и представлены в таблице.

Табл. 1.

Результаты расчетов для кедра при температуре в сушильной камере 353 К

№ п/п	$\square m$ , кг	время, с	$W_{исп} \cdot 10^3$ , кг/м <sup>2</sup> ·с	m(общее), кг	m(с.в.), кг	M, Г/МОЛЬ	gh2o	rh2o	Pп, Па	A · 10 <sup>3</sup>	
1	0,002	600	0,147	0,005	0,003	28,4	0,034	0,05	2513,6	2,7	
2	0,00195	1200	0,143	0,007	0,007	28,2	0,047	0,07	3487,4	2,8	
3	0,0021	1800	0,154	0,009	0,010	28,0	0,060	0,09	4415,9	2,9	
4	0,00215	2400	0,158	0,012	0,013	27,8	0,073	0,11	5367,0	3,1	
5	0,0022	3000	0,162	0,014	0,017	27,5	0,088	0,14	6408,6	3,1	
6	0,002	3600	0,147	0,016	0,020	27,3	0,102	0,16	7359,8	3,0	
7	0,00195	4200	0,143	0,018	0,023	27,1	0,115	0,17	8220,3	3,0	
8	0,00185	4800	0,136	0,020	0,026	26,9	0,127	0,19	8990,2	2,9	
9	0,00175	5400	0,129	0,021	0,029	26,7	0,140	0,21	9828,1	2,8	
10	0,00165	6000	0,121	0,023	0,033	26,5	0,156	0,23	10847,1	2,8	
11	0,00155	6600	0,114	0,024	0,035	26,3	0,167	0,24	11549,1	2,7	
12	0,00145	7200	0,107	0,026	0,038	26,2	0,177	0,26	12228,5	2,5	
13	0,0014	7800	0,103	0,027	0,040	26,0	0,188	0,27	12885,2	2,5	
14	0,00135	8400	0,099	0,029	0,042	25,9	0,198	0,29	13519,3	2,5	
15	0,0013	9000	0,095	0,030	0,044	25,7	0,209	0,30	14130,7	2,4	
16	0,00125	9600	0,092	0,031	0,047	25,6	0,218	0,31	14719,5	2,4	
									среднее значение	9154,4	2,8

По данным таблиц были построены зависимости массовой скорости испарения от времени и температуры и представленные на рисунках 1,2.

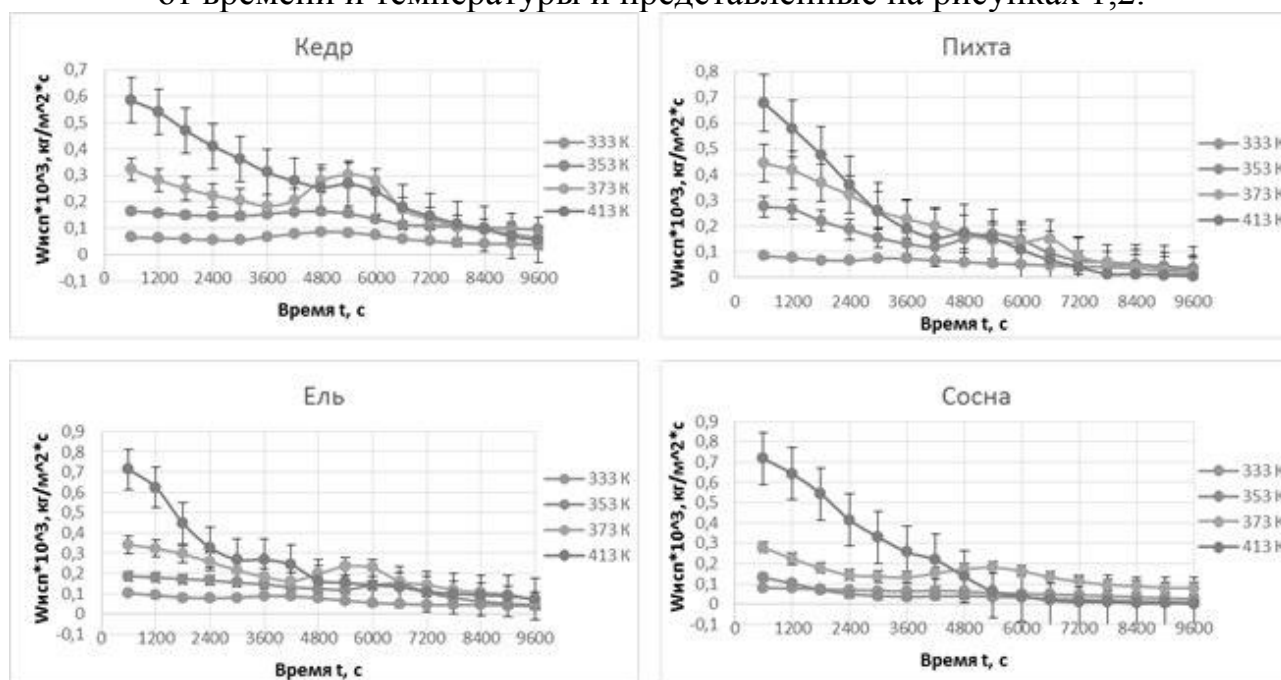


Рис.1. Зависимости массовой скорости испарения от времени

Как видно из полученных зависимостей, процесс испарения жидкости стационарный в диапазоне температур 333-353 К. Это объясняется тем, что при такой температуре за 9600 секунд не наступает период удаления связанной влаги. При температурах 373- 413 К скорость испарения понижается до определенного промежутка времени, который для всех образцов приблизительно равен 60 минутам – это первый период сушки, он соответствует удалению свободной влаги покрывающей поверхность материала. После чего начинается

удаление связанной влаги, этот период приблизительно равен 2 часам. Повышение скорости испарения перед наступлением второго периода, объясняется тем, что вместе со свободной влагой начинает испаряться и связанная, что увеличивает общую скорость испарения. Далее начинается период постоянной скорости, который говорит о том, что влага уже не испаряется из образца.

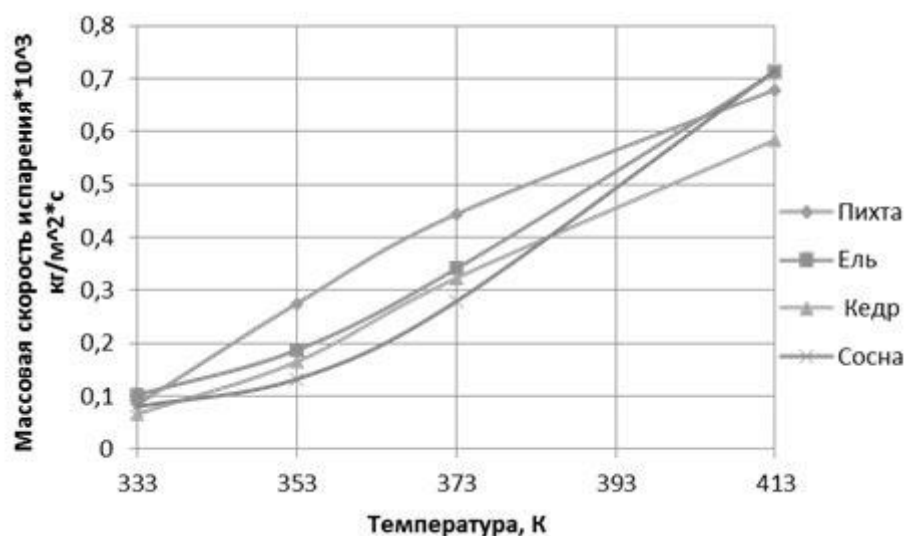


Рис. 2. Зависимость массовой скорости испарения от температуры

Анализ полученных зависимостей показал, что наивысшей скоростью испарения обладает пихта. Это связано с тем, что плотность пихты ниже плотности остальных образцов, например, ели на 15 %, а сосны на 25%. Наименьшей скоростью испарения обладает сосна, так как она устойчива к впитыванию влаги и обладает большей механической прочностью, плотностью, чем остальные образцы. Из чего следует, что сушка биомассы состоящей из пихты и ели производится при меньших временных и энергетических затратах.

### Заключение

Проведены исследования теплофизических свойств типичных для данного региона хвойных пород древесины в диапазоне температур от 333 К до 413 К. Рассчитан коэффициент аккомодации и парциальное давление на поверхности испарения для каждого образца биомассы.

Получены зависимости массовой скорости испарения от времени и температуры для каждого образца биомассы и сделаны выводы, что наиболее быстро высушивается образец пихты при меньших временных и энергетических затратах.

Результаты выполненных экспериментальных исследований могут служить базой для дальнейшего уточнения механизма удаления влаги из пористой структуры влагосодержащего материала и развития общей теории сушки. Также результаты исследований могут служить рекомендациями при разработке математической модели.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кирпичникова И.М., Филь Н.С. Древесные отходы как возобновляемый источник для получения тепловой и электрической энергии //

- Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. 2012. № 16. С. 275.
2. Семенов М.И., Суховеев М.Е. Возможности использования биомассы заготовленной древесины в лесах Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 12 С.122.
  3. Bulba, Elena Evgenievna. Experimental Research of Moisture Evaporation Process from Biomass in a Drying Chamber [Electronic resource] / E.E. Bulba, A.A. Malinovsky // MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: 2015. — Vol. 23: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. — [01053, 4 p.].
  4. Бульба Е.Е., Иванова Н.А. Экспериментальное исследование скорости испарения жидкости из хвойной биомассы [Электронный ресурс] / Е. Е. Бульба, Н. А. Иванова // МАТЭК. — МАТЕС Web Conf. 2017 — том 110: тепло-и массоперенос в системе теплового контроля технических и технологических энергетического оборудования. — [01020, 5 с.].

Научный руководитель: Е.Е. Бульба, к.т.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЛЕДОВ ЖИДКОСТНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГАЗЫ**

И.С. Войтков

Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП

Продукты сгорания, выбрасываемые промышленными предприятиями в окружающую среду, являются причиной больших тепловых потерь. Потери тепла, заключающегося в парах, достигают 12-13 % теплоты сгорания газа [1]. Вдобавок, выбросы в атмосферу продуктов сгорания оказывают негативное влияние на экологическую обстановку [2]. По этой причине утилизация тепла дымовых газов является одной из важных задач энергосбережения. Использование тепла уходящих дымовых газов на сегодняшний момент становится возможным с применением водонагревателей контактного типа, принцип работы которых заключается в нагреве подаваемой в теплообменную контактную камеру распыленной воды при непосредственном ее взаимодействии с высокотемпературными продуктами сгорания топлива.

Традиционный подход, используемый при выборе таких водонагревателей, основывается на использовании эмпирических зависимостей и известных номограмм. Важнейшее внимание при выборе конструкции и режимов работы контактных водонагревателей традиционно уделяется определению скоростей движения продуктов сгорания, гидравлическому расчету, характеристикам распыла и пр. [3-4]. Однако до настоящего времени не получено достоверной экспериментальной информации о диапазонах изменения температур продуктов сгорания при воздействии на них распыленным капельным потоком, а также