

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПОРОВОЙ ВЛАГИ ДРЕВЕСИНЫ В ТЕПЛОНАСОСНЫХ СУШИЛЬНЫХ КАМЕРАХ\*

Г.П. Васильев<sup>1</sup>, А.А. Бурмистров<sup>1</sup>, В.Ф. Горнов<sup>1</sup>,  
М.В. Колесова<sup>2</sup>, А.Н. Дмитриев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО ИВК «Экопарк-Фили»  
ул. Большая Филевская, 22, стр. 2, Москва, Россия, 121309

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 8, Москва, Россия, 117198

<sup>3</sup>Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова  
Стремянный пер., 36, Москва, Россия, 115054

В статье рассматривается одна из наиболее энергетически и экологически эффективных технологий сушки древесины, базирующихся на применении тепловых насосов. Приведенные результаты экспериментальных исследований теплового режима подтверждают высокую энергетическую и экологическую эффективность рассматриваемой технологии сушки древесины.

**Ключевые слова:** сушильная камера, тепловой насос, ограждающие конструкции, экспериментальное исследование, энергетическая и экологическая эффективность, температурно-влажностный режим.

Одной из наиболее энергетически и экологически эффективных технологий сушки древесины сегодня являются технологии, базирующиеся на применении тепловых насосов, использующих в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии теплоту фазовых переходов поровой влаги в древесине. Эта технология лишена недостатков, свойственных традиционным конвективным технологиям сушки. Принципиальная схема теплонасосной (конденсационной) сушильной камеры приведена на рисунке.

В конвекционных сушилках влага из древесины, перешедшая в сушильный агент, удаляется из камеры путем воздухообмена — сушильный агент обменивается на наружный воздух. В теплонасосной технологии влага, содержащаяся в циркулирующем сушильном агенте, удаляется при помощи ее конденсации на испарителе теплового насоса. В конденсаторе сушильный агент нагревается, а в испарителе охлаждается. При этом сушильный агент осушается за счет выпадения капельной влаги и отвода ее за пределы камеры.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» по государственному контракту № 16.516.11.6113 от 25 августа 2011 года.

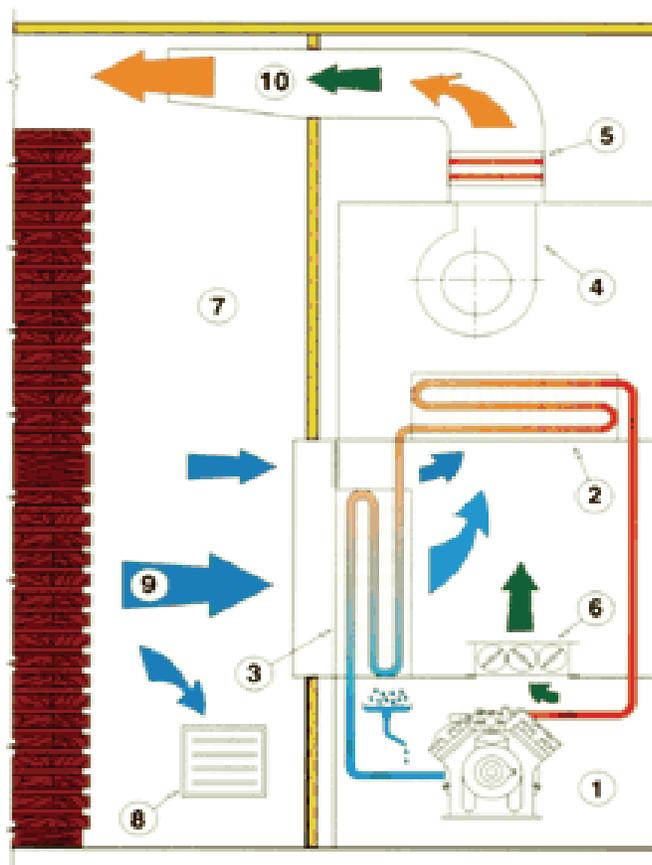


Рис. Принципиальная схема теплонасосной сушильной камеры:

1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — испаритель; 4 — главный вентилятор; 5 — дополнительный нагрев; 6 — заслонка поступления свежего воздуха (подмес); 7 — корпус сушильной камеры; 8 — воздухообменный клапан; 9 — отработанный (влажный) воздух; 10 — канал подачи в камеру сухого воздуха

В теплонасосных камерах вообще нет обмена сушильного агента на воздух окружающей среды — полная рециркуляция сушильного агента, температура сушки — не более 70 °С. Температурный режим ограничен теплофизическими свойствами хладагентов: при более высокой температуре воздуха в камере невозможна реализация холодильного цикла, а следовательно, и конденсация влаги из сушильного агента.

Для изучения технологических особенностей сушки древесины с помощью тепловых насосов в группе инновационных компаний «ИНСОЛАР» была создана экспериментальная теплонасосная камера, использующая в качестве источника тепла низкого потенциала теплоту фазовых переходов поровой влаги древесины.

Для создания наружных ограждающих конструкций сушильной камеры была выбрана технология «Пластбау». По простоте, скорости строительства, теплозащите и звукоизоляции эта технология относится к высоким технологиям в строительной индустрии. В основу технологии «Пластбау» положено использование стеновых блоков из специального строительного пенополистирола, а так-

же плит перекрытий различной длины в качестве несъемной опалубки (максимальная длина перекрытий определяется расчетной полезной нагрузкой — обычно не более 8 м). Смонтированная из стеновых блоков ограждающая конструкция заполняется тяжелым бетоном в полости блоков, образуя железобетонные колонны. Покрытие выполняется как обычное монолитное ребристое железобетонное покрытие, опирающееся на железобетонные столбы в стенах камеры. Пенополистирольные элементы несут функции опалубки, утеплителя, звукоизоляции, а технологические отверстия служат вентиляционными каналами.

Таким образом, в результате двух технологических операций (монтаж стеновых блоков и монтаж плит перекрытий) сооружается камера, которую можно рассматривать как жесткую пространственную рамную конструкцию, обрамленную тепло- и звукоизоляционной оболочкой из пенополистирола. После небольшого объема отделочных работ по элементам из пенополистирола (пароизоляция и оштукатуривание стен и потолков) коробка сушильной камеры готова за короткий срок строительства.

Для производства элементов несъемной опалубки (элементы стен и перекрытий) используется специальный вспенивающийся самозатухающий полистирол с поверхностной обработкой частиц по ТУ 301-05-164-92 или его аналоги. В основном используют вспенивающийся полистирол Р-251 производства Южной Кореи или фирмы БАСФ (Германия).

Элементы несъемной опалубки имеют следующие габариты: стеновые элементы 300×330×1200 мм и элементы перекрытий 180×600 мм различной длины. Плотность вспененного полистирола в элементах несъемной опалубки составляет от 18 до 25 кг/м<sup>3</sup> [4; 5; 7; 8].

Элементы стен и перекрытий из пенополистирола практически не впитывают влагу и полностью пропускают воздух, который содержится в окружающем пространстве. Низкие зимние температуры не оказывают влияния на физические и химические свойства пенополистирола. При температурах до 80 °С вспененный полистирол не меняет своих свойств даже при длительном воздействии, что идеально подходит для теплонасосных сушильных камер.

Элементы из вспененного полистирола не содержат веществ, которые могут питать микроорганизмы, не подвержены разрушающему действию коррозии, плесени, грибков и бактерий, а также других факторов, которые могут отрицательно повлиять на несущую способность возведенных строительных конструкций.

Экспериментальная теплонасосная сушильная камера ТСК 15Э была построена на территории ФГУП «Рыбинский завод приборостроения» в г. Рыбинске.

Представленные данные наглядно иллюстрируют эффективность технологии теплонасосной сушки древесины. Практически на всем протяжении процесса сушки в теплонасосном оборудовании относительная влажность воздуха понижалась на 45% (с 55% до 10%) при температуре воздуха на выходе из испарителя теплонасосного оборудования 26—32 °С и 42—52 °С после конденсатора. При этом средняя потребляемая камерой электрическая мощность составила за этот период 6,53 кВт [1; 2].

В табл. 1 представлены результаты экспериментов по определению тепловых потерь, проведенных при выключенном компрессоре, а в табл. 2 — при вклю-

ченной циркуляционной вентиляции. В табл. 3 приведены удельные теплотепотери сушильной камеры, рассчитанные на основе экспериментальных данных.

Таблица 1

**Замеры, произведенные при выключенном компрессоре и установившейся температуре воздуха внутри камеры**

№ за-мера	Время замера	Температура воздуха в камере, °С	Температура наружного воздуха, °С	Показания эл. счетчика, кВтч	Расход энергии, кВтч	Теплотепература камеры в расчете на 1 градус перепада температур между наружным воздухом и воздухом в камере, кВтч/град
1	11:00	-2,8	-10	2020	0	0
2	12:00	4,3	-10	2024	4	0,27972028
3	13:00	6,7	-10	2028	4	0,239520958
4	14:00	8,9	-10	2032	4	0,211640212
5	15:00	10	-10	2039	7	0,35
6	16:00	11	-10	2044	5	0,238095238
7	17:00	12,1	-10	2048	4	0,180995475
8	18:00	13,5	-10	2053	5	0,212765957
9	19:00	14,6	-10	2057	4	0,162601626
Средние теплотепература в расчете на 1 градус перепада температур, кВтч/град						0,2344175

Таблица 2

**Замеры, произведенные при включенной циркуляционной вентиляции и установившейся температуре воздуха внутри камеры**

№ за-мера	Время замера	Температура воздуха в камере, °С	Температура наружного воздуха, °С	Показания эл. счетчика в кВтч	Расход энергии, кВтч	Теплотепература камеры в расчете на 1 градус перепада температур между наружным воздухом и воздухом в камере, кВтч/град
1	8:00	22,4	-8	2586	0	0
2	9:00	22,3	-8	2585	-1	-0,0330033
3	10:00	22,6	-8	2590	5	0,163398693
4	11:00	23,5	-8	2599	9	0,285714286
5	12:00	24,5	-8	2609	10	0,307692308
6	13:00	25,8	-8	2621	12	0,355029586
7	14:00	26,5	-8	2633	12	0,347826087
8	15:00	27	-8	2639	6	0,171428571
9	16:00	27,3	-8	2644	5	0,141643059
Средние теплотепература в расчете на 1 градус перепада температур, кВт/град						0,253247513

Таблица 3

**Удельные теплотепература сушильной камеры, рассчитанные на основе экспериментальных данных**

Удельные теплотепература камеры	0,2 кВт/град	Удельные теплотепература камеры в расчете на 1 кв. м площади пола	0,007936508 кВт/кв. м град
Теплотепература камеры при разнице температур внутреннего и наружного воздуха 50 град	10 кВт	Удельные теплотепература камеры в расчете на 1 кв. м площади пола при разнице температур внутреннего и наружного воздуха 50 град	0,396825397 кВт/кв. м

Во время сушки осуществлялся контроль за отводимой влагой, в среднем скорость образования конденсата составляла 10 л/час.

В результате проведенных экспериментальных исследований теплового режима экспериментальной теплонасосной сушильной камеры ТСК-15Э подтверждена ее энергетическая и экологическая эффективность. В табл. 4 приведены основные показатели камеры ТСК-15Э, рассчитанные на основе полученных экспериментальных данных при условии сушки 15 м<sup>3</sup> соснового пиломатериала от 50% весовой влажности до 10% при температуре 50 °С.

Таблица 4

**Основные показатели камеры ТСК-15Э**

Показатель	Единица измерения	ТСК-15Э	Традиционная технология
Камера расположена под открытым небом в г. Рыбинске: $t_{расч} = -31,0 \text{ } ^\circ\text{C};$ $t_{ср. год} = 3,2 \text{ } ^\circ\text{C}$			
Мощность установленного теплогенерирующего оборудования, из них: — электрическая — тепловая	кВт	20,0	74,0
		4,0 16,0	— 74
Годовое потребление энергии	МВтч	100,0	493,0
Экономия энергии в год	МВтч	393,0	—
Экономия энергии	%	<b>80,0</b>	—
Среднегодовой расход энергии на сушку 1 куб. м пиломатериала	кВтч/м <sup>3</sup>	52,0	632,0
Средний расход энергии на сушку 1 м <sup>3</sup> пиломатериала в наиболее холодную неделю года	кВтч/м <sup>3</sup>	225	828,0
Камера расположена в помещении: $t_{вн} = 15,0 \text{ } ^\circ\text{C}$			
Мощность установленного теплогенерирующего оборудования, из них: — электрическая — тепловая	кВт	4,0	54,0
		4,0 —	— —
Годовое потребление энергии	МВтч	45,0	453,6
Экономия энергии в год	МВтч	408,6	—
Экономия энергии	%	<b>90,0</b>	—
Среднегодовой расход энергии на сушку 1 м <sup>3</sup> пиломатериала	кВтч/ м <sup>3</sup>	23,0	580,0

**Экологическая эффективность  
теплонасосных сушильных камер.  
Выбросы в процессе сушки древесины**

В процессе работы сушильной камеры происходит выделение вредных веществ, однако соответствующих фундаментальных исследований не проводилось, экологический налог с предприятий, загрязняющих подобным образом среду, не взимается. Однако в древесине содержится достаточное количество химических соединений, таких как фенольные соединения, углеводы, простейшие полифе-

нолы, органические кислоты, минеральные и азотсодержащие вещества, смоляные кислоты и спирты, эфиры смоляных кислот и смоляных спиртов или одноатомных фенолов, химически инертные вещества, а также эфирные масла и вода [2].

Конвекционная технология сушки применяется в промышленности наиболее широко. Она предполагает нагрев высушиваемого материала посредством сушильного агента, предварительно нагретого с использованием тепловой энергии пара, горячей воды либо при сжигании топлива. Генерация тепловой энергии, как правило, происходит вне сушильной камеры в отдельно стоящих или пристроенных котельных за счет сжигания топлива (природный газ, уголь, дрова, опилки, отходы деревообрабатывающего производства), что сопровождается выбросами в атмосферу вредных веществ. При расчете на выработку 1 кВт/ч тепловой энергии при сжигании, к примеру, газа (газовые сушильные камеры) требуется  $0,8 \text{ м}^3$ , в пересчете на год порядка 1544 кВт/ч — количество тепловой энергии, выработанной при сжигании  $1235,230 \text{ м}^3$  газа в год. За счет того, что теплонасосная сушильная камера использует для своей работы энергию грунта, идет значительная экономия энергии (см. табл. 1), примерно 61—63%, что сопровождается экономией на выбросах (от несжигания топлива), которые составляют приблизительно 7039,66315 т/год, значительная часть которых относится к первому классу опасности [3].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Акищенко С.И.* Деформативность и растрескивание пиломатериалов при сушке // *Технология и оборудование деревообрабатывающих производств.* — Л., 1989.
- [2] *Васильев Г.П., Бурмистров А.А., Колесова М.В.* Использование теплоты грунта в комбинации с теплотой фазовых переходов поровой влаги древесины в теплонасосных сушильных камерах // *Энергетик.* — 2012. — № 5.
- [3] *Васильев Г.П., Бурмистров А.А., Колесова М.В.* Экологическая эффективность теплонасосных сушильных камер, использующих низкопотенциальную теплоту фазовых переходов поровой влаги древесины в комбинации с теплом грунта» // *Энергетик.* — 2012. — № 4.
- [4] *Васильев Г.П.* Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли: Монография. — М.: Гранита, 2006.
- [5] *Кречетов И.В.* Сушка древесины. Учеб. пособие для вузов. — Изд. 4, перераб. и доп. — М.: Бриз, 1997.
- [6] *Пейч М.Н., Царев Б.С.* Справочник по сушке древесины. — М., 1975.
- [7] *Попова А.М., Сергеева С.В., Сергеева В.В., Тракало Ю.И.* Опыт эксплуатации камер с теплоэлектронагревателями для сушки пиломатериалов // *Деревообрабатывающая пром-сть.* — 1997. — № 2. — С. 19—21
- [8] *Расев А.И.* Сушка древесины. — М.: Высшая школа, 1990.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF USING THE HEAT OF PHASE TRANSITIONS STEAM MOISTURE OF THE WOOD IN THERMAL-PUMP DRYING CHAMBERS**

**GP. Vasiliev<sup>1</sup>, A.A. Burmistrov<sup>1</sup>, V.F. Gornov<sup>1</sup>,  
M.V. Kolesova<sup>2</sup>, A.N. Dmitriev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>JSC IEC “Ecopark-fili”  
*Bolshaya Filevskaya str., 22-2, Moscow, Russia, 121309*

<sup>2</sup>Peoples’ Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russia, 117198*

<sup>3</sup>Plekhanov Russian University of Economics  
*Stremyanniy, 36, Moscow, Russia, 115054*

The article deals with one of the most energetically and ecologically effective technologies of wood drying. Special construction polystyrene wall blocks are used as frame fillings of experimental the drying chamber according to the technology “Plastbau”, known with its ability to improved heat-insulating properties. The results of the experimental study of the thermal regime show the high energy and ecological efficiency of this wood drying technology.

**Key words:** drying chamber, thermal-pump, frame fillings, experimental study, energy and ecological efficiency, temperature-humidity regime.