

*Глаголев С.Н., д-р экон. наук, проф.,  
Севостьянов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
Гридчин А.М., д-р техн. наук, проф.,  
Трубаев П.А., д-р техн. наук, проф.,  
Севостьянов М.В., канд. техн. наук, доц.,  
Коцуков А.В., аспирант*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## ТЕПЛОВЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ЭКСТРУДИРОВАНИЮ И СУШКЕ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

atlax@mail.ru

*Одной из актуальных задач современного производства является экономия топливно-энергетических ресурсов при комплексной переработке различных техногенных материалов. В этой связи значимость создания небольших малотоннажных технологических комплексов для производства и переработки различных материалов строительной индустрии стало очень актуально. Комплексная переработка сырьевых и техногенных материалов, а также создание безотходных производств - одно из важнейших направлений развития различных отраслей промышленности. Научными сотрудниками БГТУ им. В. Г. Шухова спроектирован и изготовлен малотоннажный технологический комплекс для производства экструдированных техногенных материалов, который является инновационным предприятием по производству конкурентоспособных стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона. В результате исследований была выявлена эффективность использования парогенератора для увлажнения материала и использование барабанно-винтового сушильного агрегата для сушки сформованных гранул.*

**Ключевые слова:** *малотоннажные технологические комплексы; техногенные материалы; стабилизирующие добавки, парогенератор, барабанно-винтовой сушильный агрегат.*

Интенсивный рост промышленного производства России и мировой индустрии, а также внедрение новых технологий переработки неорганических и органических материалов влечет за собой появление огромного количества отходов. Современные промышленные производства зачастую ориентированы на первичную прибыль из природного сырья, не уделяя должного внимания проблеме утилизации техногенных материалов в технологических комплексах [1, 2].

В промышленности строительных материалов (ПСМ) достаточно успешно внедрена практика вторичного использования отходов, а также техника и технологии переработки техногенных материалов методом компактирования: экструдирования, гранулирования, брикетирования, прессования и др [3].

Основную массу техногенных волокнистых материалов (ТВМ) - представляют целлюлозно-бумажные отходы (ЦБО). Целлюлоза самый распространенный полимер на земле, который играет важную роль в природном круговороте углерода. Однако ежегодное увеличение отходов целлюлозно-бумажной промышленности и загрязнение ими окружающей среды ставит ряд задач по утилизации ЦБО. Поскольку целлюлоза – это органическое соединение, состоящее из нерастворимых волокон, которые не расщепляются обычными ферментами желудочно-кишечного тракта млекопитающих, а расщепление в промышленных условиях целлюлозы до

глюкозы очень сложно и требует колоссальных энергетических затрат, то процесс компактирования ТВМ в сформованные тела заданной геометрической формы с последующим использованием – является одним из приоритетных направлений в настоящее время [4].

Одним из направлений утилизации бумажных отходов является производство на их основе гранулированных стабилизирующих добавок (ГСД) для щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА). В условиях рыночной экономики, в сфере малого и среднего бизнеса стало актуально внедрение небольших малотоннажных технологических комплексов для производства и переработки различных материалов строительной индустрии. Создание небольших малотоннажных технологических комплексов влечет за собой разработку экономичного, малогабаритного и менее металлоемкого оборудования - в частности сушильных агрегатов. Сушка является неотъемлемой частью во многих сферах производственной деятельности, а на отдельных направлениях сушильное оборудование занимает до 30% производственных площадей, потребляет до 40% всего расходуемого тепла и до 30% электроэнергии [5, 6].

С учетом выполненных научно-технических и конструкторско-технологических разработок коллективом сотрудников университета спроектирован и изготовлен малотоннажный технологический комплекс для производ-

ства экструдированных техногенных материалов (рис. 1). Технологический комплекс предназначен для получения экструдированных техногенных материалов различного функционального назначения (ГСД ЩМА, топливных пеллет, ор-

ганоминеральных удобрений, теплоизоляционных наполнителей и др.), но основную роль уделяется созданию гранулированных стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона [7-9].

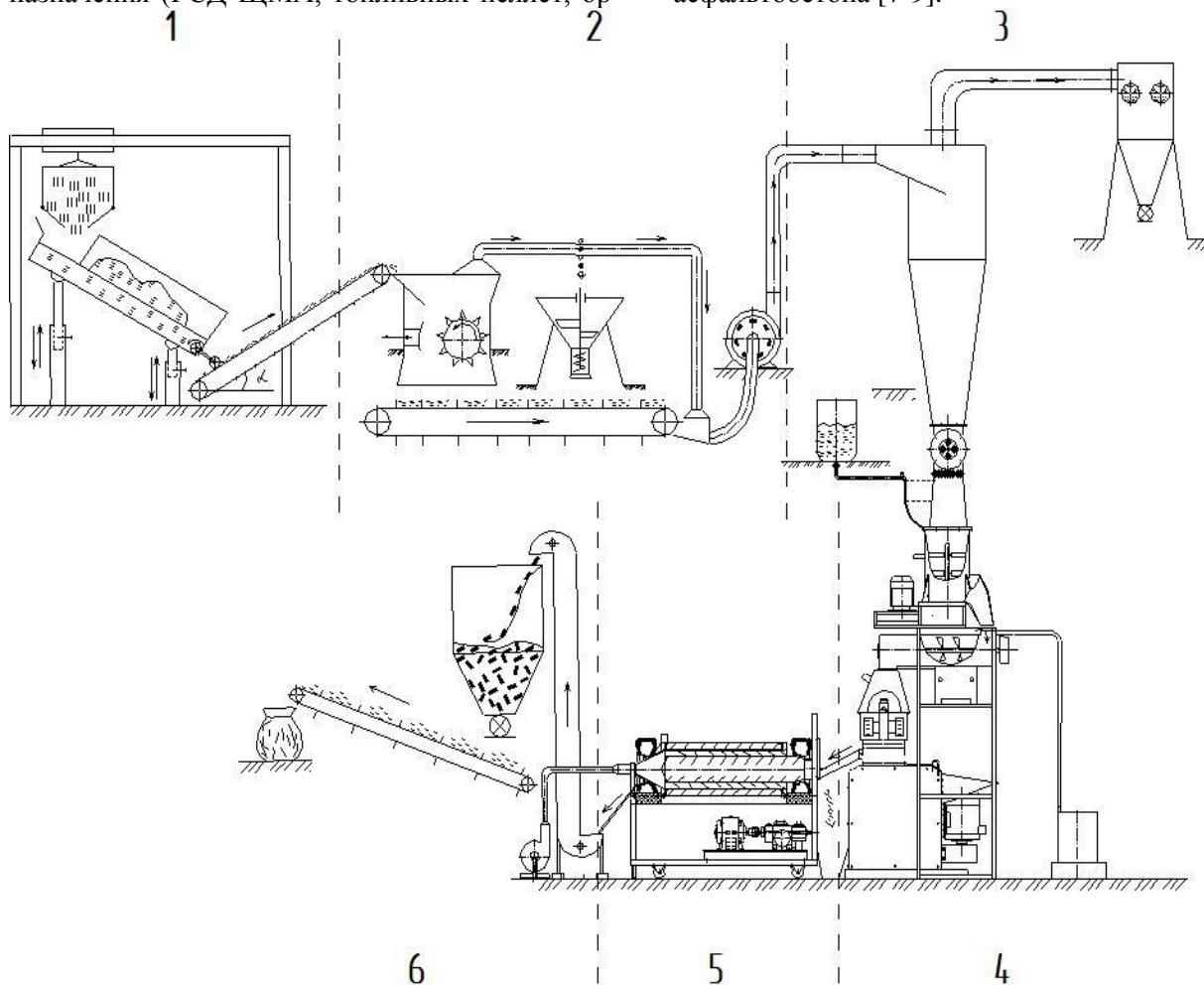


Рис. 1. Малотоннажный технологический комплекс для производства экструдированных техногенных материалов: 1 - зона загрузки; 2 - зона измельчения; 3 - зона аспирации; 4 - зона смешения и компактирования; 5 - зона классификации и сушки; 6 - зона упаковки готовой продукции

Технологический комплекс содержит шесть зон, каждая из которых выполняет свои функции: 1- зона загрузки; 2- зона измельчения; 3- зона аспирации; 4- зона смешения и компактирования; 5- зона классификации и сушки; 6- зона упаковки готовой продукции.

Зона классификации и сушки содержит барабанно-винтовой сушильный агрегат (БВСА) для сушки экструдированных техногенных материалов, который был создан для повышения эффективности процессов тепломассообмена в сушильном барабане, повышения его тепловой мощности и производительности технологической линии в целом [8, 9].

Использование разработанной конструкции БВСА обеспечивает выполнение следующих конструктивно-технологических функций:

- перфорированный участок внутреннего барабана обеспечивает удаление просыпи мате-

риала. Реализация этого принципа позволяет при сушке экструдированных материалов возвращать просыпь на повторную грануляцию и исключать ее налипания на внутреннюю рабочую поверхность барабана;

- транспортирующий геликоид с изменяющимся шагом по длине барабана позволяет материалу равномерно распределяться тонким слоем по всей внутренней поверхности барабана и не «запирать» влагу на начальной стадии сушки, где максимальное влагоотделение;

- используемый вариатор позволяет изменять частоту вращения барабана для более эффективной сушки материала с различной начальной влажностью;

- тангенциальное движение теплоносителя по спирали геликоида и искусственно созданное разрежение внутри сушильного агрегата способствует эффективному удалению влаги из рабо-

чей камеры;  
 - выделенная тепловая энергия в ходе сушки и отработанный пар не выбрасываются в атмосфе-

ру, а рециркулируются как в зоне классификации и сушки, так и в зоне смешения и компактирования.

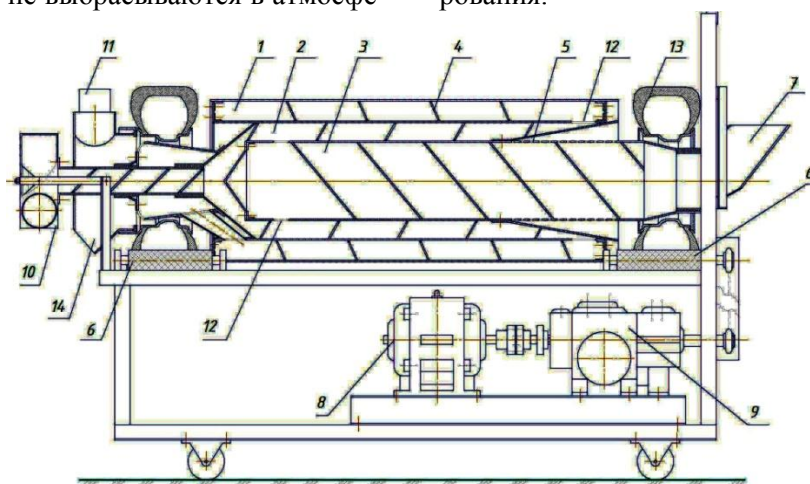


Рис. 2. Барабанно-винтовой сушильный агрегат для сушки гранулированных техногенных материалов:  
 1- внутренний барабан; 2- средний барабан; 3-внешний барабан; 4- геликоид; 5-сетка; 6- опорные ролики;  
 7- загрузочный бункер; 8-привод; 9- вариатор; 10-воздуховодная камера; 11-отвод пара; 12-выгрузочные окна;  
 13- пневморолики; 14- выгрузочная камера

Расчет основных теплотехнических и конструктивно-технологических параметров разработанных нами БВСА и технологической линии производим на основании классических положений теории сушки [10].

Исходный материал имеет влажность

3...6%. Низкая влажность приводит к большим затратам энергии при смешении и компактировании, а также к перегреву валков в пресс-валковом экструдере. Это вызывает необходимость увлажнения материала и последующей сушки полученных гранул (рис. 3).

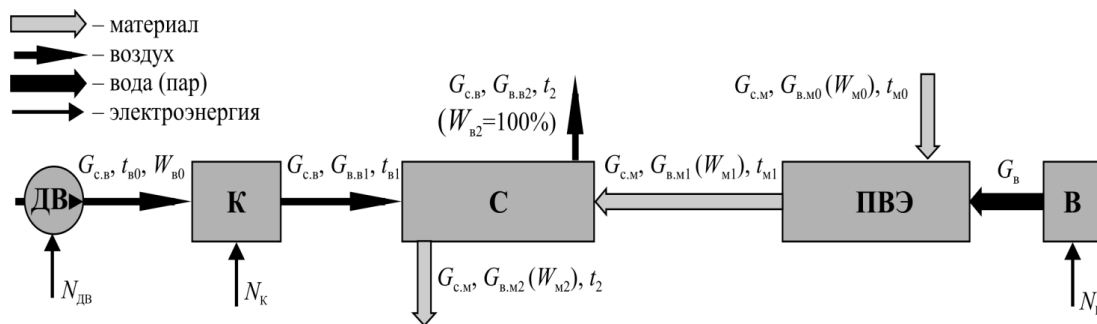


Рис. 3 Схема участка компактирования и сушки:

ДВ – дутьевой вентилятор для подачи воздуха на сушку; К – калорифер для подогрева воздуха; С – сушильный агрегат; ПВЭ – пресс-валковый экструдер; В – источник влаги (воды или пара)

Расход влаги  $G_{в}$ , кг/с, которую необходимо подавать в экструдер, может быть определён из выражения:

$$G_{в} = G_{в,м1} - G_{в,м0} = G_{с,м} [W_{м1}/(100 - W_{м1}) - W_{м0}/(100 - W_{м0})], \quad (1)$$

где  $G_{в,м1}$ ,  $G_{в,м0}$  – расход влаги, содержащейся в материале после и до экструдера, кг/с;  $G_{с,м}$  – расход сухого материала, кг/с;  $W_{м1}$ ,  $W_{м0}$  – влажность материала после экструдера и начальная влажность, %.

Влага может быть подана двумя способами: с помощью распыления воды и с помощью пара. Первый способ не требует дополнительных рас-

ходов энергии, кроме затрат на работу насоса, во втором необходима энергия для приготовления пара. Но из-за плохого смешения воды с материалом, такой способ требует повышенного расхода влаги и влажность материала после компактирования составляет около 30%. При увлажнении паром влажность материала после компактирования достигает почти 20%.

Тепловой баланс участка смешения и компактирования можно представить в виде:

$$(G_{с,м} c_{с,м} + G_{в,м0} c_{в}) t_{м0} + H_{в} = (G_{с,м} c_{с,м} + G_{в,м1} c_{в}) t_{м1} + H_{п}, \quad (2)$$

где  $c_{с,м}$ ,  $c_{в}$  – удельная массовая теплоёмкость материала и влаги, принята 1,35 и

1,00 кДж/(К·кг);  $t_{m0}, t_{m1}$  – температура влажного материала на входе и выходе, °С;  $H_b$  – расход тепловой энергии воды или энтальпия пара в единицу времени, кВт;  $H_{п}$  – потери теплоты в окружающую среду, кВт.

Если для увлажнения используется вода, то её тепловая энергия определяется из выражения:

$$Q_b = G_b \cdot c_b \cdot t_0, \quad (3)$$

где  $t_0$  – температура воды, используемой для увлажнения. Если используется пар, то энтальпия насыщенного пара определяется по его давлению согласно методике, приведённой в работе [11]. При этом теплота конденсации пара в уравнении учтена в виде разности энтальпии пара и теплосодержания конденсирующейся из него воды. Для приготовления пара используется парогенератор, имеющий избыточное давление на выходе 0,35...0,55 МПа. При этом давление получаемого насыщенного пара незначительно влияет на термодинамические характеристики и затраты энергии на его получение. Так, при абсолютном давлении 0,45 МПа температура насыщенного пара 148°С и удельная энтальпия 2743 кДж/кг. При давлении пара 0,65 мПа – соответственно, 162°С и 2760 кДж/кг. Мощность, потребляемая парогенератором, кВт, оценивалась по выражению:

$$N_{п} = G_b \cdot (H_b - c_b \cdot t_{b0}) / \eta_{п}, \quad (4)$$

где  $\eta_{п}$  – КПД парогенератора.

При увлажнении материала паром для обеспечения его конденсации, от него необходимо отводить теплоту. Отвод теплоты может быть осуществлён за счёт нагрева материала и потерь в окружающую среду. Анализ уравнения (2) показывает, что конденсация только за счёт нагрева материала возможно при соблюдении неравенства

$$H_b \leq (G_{c.m} c_{c.m} + G_{b.m1} c_b) t_{m1} - (G_{c.m} c_{c.m} + G_{b.m0} c_b) t_{m0}, \quad (5)$$

Расчёты показали, что при избыточном давлении насыщенного пара 0,35...0,55 МПа и начальной влажности материала 3% равенство (5) соблюдается при конечной влажности материала не выше 8%, что недостаточно для проведения процесса компактирования.

Потери теплоты (отношение  $H_{п}/H_b$ ) при указанных условиях и более высокой конечной влажности составляют:

Влажность материала $W_{m2}$	10%	15%	20%
Потери	27%	55%	66%

Таким образом при увлажнении паром часть энергии, расходуемая на его приготовление, будет теряться.

В БВСА можно принять, что воздух на вы-

ходе находится в стоянии насыщения (его относительная влажность  $W_{b2}$  равна 100%). Так как схема движения потоков в большей части сушильного барабана имеет вид прямотока, то температура потоков на выходе принята одинаковой. Тепловой баланс сушилки может быть представлен в виде:

$$(G_{c.m} c_{c.m} + G_{b.m1} c_b) t_{m1} + (G_{c.b} c_{c.b} + G_{b.b1} c_{b.b}) t_{b1} = [(G_{c.m} c_{c.m} + G_{b.m2} c_b) + (G_{c.b} c_{c.b} + G_{b.b2} c_{b.b})] t_2, \quad (6)$$

где  $G_{c.b} c_{c.b}$  – расход сухого воздуха, кг/с;  $G_{b.b1}, G_{b.b2}$  – расход водяных паров, содержащихся в воздухе, до и после сушилки, кг/с;  $c_{c.b} + G_{b.b1} c_{b.b}$  – удельная теплоёмкость водяных паров, кДж/(кг·К);  $t_2$  – температура высушенного материала и воздуха после сушилки, °С.

В уравнении (6), так же как и в уравнении (2), для расчёта теплосодержания влажного материала и воздуха использовался аддитивный принцип, при котором рассматривался расход сухого материала или воздуха, и расход влаги и водяных паров.

Массовый расход водяных паров на входе в БВСА  $G_{b.b1}$  определялся по параметрам воздуха окружающей среды, по его задаваемой относительной влажности  $W_{b0}$  и температуре  $t_{b0}$ . Массовый расход водяных паров на выходе из агрегата  $G_{b.b2}$  определялся по свойствам воздуха в состоянии насыщения при температуре  $t_2$ . Для автоматизированного расчёта свойств влажного воздуха использовались методы, приведенные в работах [12-14].

В уравнении (6) неизвестным является температура  $t_2$ , от которой зависит расход воздуха на сушку и теплосодержание потоков на выходе. Решение уравнения производится численным методом.

Затраты электроэнергии на нагрев воздуха в калорифере в единицу времени  $N_k$ , кВт, определялись из выражения:

$$N_k = (G_{c.b} c_{c.b} + G_{b.b1} c_{b.b})(t_{b1} - t_{b0}) / \eta_k, \quad (7)$$

где  $\eta_k$  – КПД калорифера.

Затраты электроэнергии на работу вентилятора в единицу времени  $N_{дв}$ , кВт, определялись из выражения:

$$N_{дв} = (G_{c.b} + G_{b.b1}) \Delta p / (\eta_{дв} \cdot \rho_b), \quad (8)$$

где  $\Delta p$  – сопротивление воздухопроводов и сушилки, кПа;  $\eta_{дв}$  – КПД вентилятора;  $\rho_b$  – плотность влажного воздуха, кг/м<sup>3</sup>, при температуре  $t_{b0}$ , °С. Затраты электроэнергии в единицу времени на работу насоса, подающего воду в парогенератор при увлажнении паром или непосредственно в экструдер при увлажнении водой не учитывались, так как в обоих случаях из-за небольшого расхода воды (не более 0,1 м<sup>3</sup>/ч) они составляют незначительную величину, около 0,030...0,040

кВт.

Для анализа работы технологической линии произведён расчёт параметров при следующих исходных данных: расход сухого материала 200 кг/ч, исходная влажность материала 3%, конечная влажность материала после сушки – 8%. Температура гранул после экструдера перед су-

шилкой – 60°C. Давление насыщенного пара при использовании парогенератора – 0,45 МПа. Расчёт был произведён для зимних и летних условий, в качестве параметров воздуха окружающей среды принимались климатические данные для Белгородской области:

Условия	Зимние	Летние
Температура воздуха $t_{в0}$ , °С	-9,3	19,4
Относительная влажность воздуха $W_{в0}$ , %	84	67
Исходная температура материала, °С	5	20
Температура воды $t_0$ , °С	10	20

Было произведено сравнение затрат электроэнергии  $N$  на работу линии, которые включают три составляющие, зависящие от параметров увлажнения и сушки:  $N_{ДВ}$ ,  $N_{К}$ ,  $N_{П}$ . Затраты электроэнергии, расходуемые на приводы агре-

гатов: смесителей, экструдера и сушки (которые будут постоянные в разных режимах сушки) не учитывались. Полученные результаты приведены в табл. 1

Таблица 1

**Потребляемая мощность агрегатов технологической линии, кВт**

Режим увлажнения	Водой ( $W_{м1} = 30\%$ )		Паром ( $W_{м1} = 20\%$ )	
	зимние	летние	зимние	летние
Климатические условия				
Дутьевой вентилятор, $N_{ДВ}$	7,6	8,2	3,4	3,6
Калорифер, $N_{К}$	88,5	64,3	39,6	28,2
Парогенератор, $N_{П}$	–	–	41,2	40,6
Всего, $N$	96,1	72,6	84,3	72,4

Как видно из табл., суммарные затраты электроэнергии при увлажнении паром материала сопоставимы или меньше, чем при увлажнении водой, даже при значительных потерях энергии пара. Это связано с тем, что при увлажнении паром влажность материала ниже, чем при увлажнении водой, что требует меньшего расхода на нагрев воздуха, идущего на сушку, и работу дутьевого вентилятора.

Также было проведён анализ затрат электроэнергии при различной степени нагрева воздуха в калорифере (рис. 4).

Полученные результаты показывают, что при более сильном нагреве воздуха суммарные затраты электроэнергии снижаются. Это объясняется снижением расхода воздуха, необходи-

мого на сушку. В процессе компактирования шихты для увлажнения материала более рационально использовать пар. При этом расходуется меньшее количество электроэнергии и происходит более равномерное увлажнение шихты, по сравнению с увлажнением методом распыления воды. Для снижения расхода электроэнергии необходимо обеспечивать более сильный нагрев воздуха, подаваемого на сушку.

Проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования позволяют обеспечивать рациональные условия процессов подготовки шихты к формованию, ее экструдирования, последующей классификации и сушки сформованной продукции.

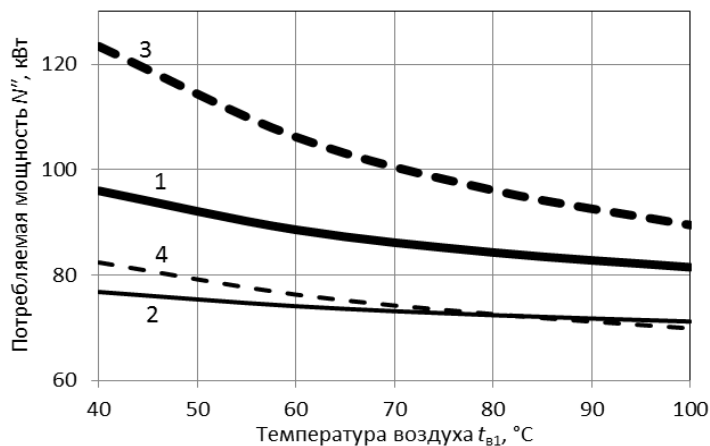


Рис. 4. Зависимость потребляемой мощности от величины нагрева воздуха в калорифере: Увлажнение паром ( $W_{м1} = 20\%$ ): 1 – зимние условия, 2 – летние условия; увлажнение водой ( $W_{м1} = 30\%$ ): 3 – зимние условия, 4 – летние условия

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Перерва П. Г., Глагольев С. Н., Мехович С. А. Основы инновационного менеджмента и экономики инноваций, Ч.1. Белгород-Харьков: Изд-во БГТУ, 2012. 545 с.
2. Гридчин А. М., Севостьянов В. С., Уральский А. В. Энергосберегающая техника и технологии для комплексной переработки природных и техногенных материалов// Эковестник России. 2010. №1. С.68-79.
3. Ильина Т. Н., Севостьянов М. В., Шкарпеткин Е. А. Конструктивно-технологическое совершенствование агрегатов для гранулирования порошкообразных материалов// Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2010. №2. С. 100 – 102.
4. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М: Изд. Химия, 1984. 320 с.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М: Изд. Химия, 1971. 784 с.
6. Классен П. В, Гришаев И. Г., Шомин И. П. Гранулирование. М: Изд. Химия, 1991. 240 с.
7. Заявка на изобретение РФ №2014149776, 09.12.2014. Глаголев С. Н., Севостьянов В.С., Гридчин А. М., Севостьянов М. В., Трубаев П. А., Уральский В. И., Филатов В. И., Кошуков А. В. Технологическая линия и способ для экструдирования техногенных волокнистых материалов.
8. Заявка на изобретение РФ №2013138030, 13.08.2013. Севостьянов В. С., Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Кошуков А. В., Бабуков В. А., Емельянов Д. А. Барабанно-винтовой сушильный агрегат для сушки гранулированных и сыпучих материалов.
9. Кошуков А. В, Бабуков В. А., Емельянов Д. А. Агрегат для сушки гранулированных и сыпучих материалов// Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов. 2013. Ч I. С. 121-123.
10. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.: Изд. Госэнергоиздат, 1962. 320 с.
11. IAPWS (2007), Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam [Электронные ресурсы]. <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>.
12. Гаврилкин В.П., Куранов Е.А. Аналитическое определение параметров влажного воздуха // Вестник АГТУ. 2007. № 2(37). С. 148-151.
13. Феоктистов А.Ю., Ильина Т.Н., Овсянников Ю.Г. Аналитическое описание процессов обработки воздуха в центральных кондиционерах. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2010. № 1. С. 136-139.
14. Кулешов М.И., Кондрашов И.Б., Губарев А.В. Построение I-d-диаграммы влажного газа с помощью ЭВМ. Промышленная энергетика. 2007. № 5. С. 29-31.