

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИННОВАЦИОННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА И СОКРАЩЕНИЯ РАСХОДОВ СУБЪЕКТОВ ЭКОНОМИКИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Из достигнутого уровня техники известны основные направления по снижению влияния осадков сточных вод целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) – скопа. В целях снижения такого влияния необходимо обезвоживание осадка до минимального значения остаточной влажности. Для обезвоживания применяются различные методы, но ни один из известных методов не отличается энергоэффективностью и низкими энергозатратами. Для решения вопроса экономии ресурсов и средств промышленных предприятий, предлагается использование инновационного способа обезвоживания осадков сточных вод ЦБП – электроосмотическое обезвоживание.

Материалы и методы. В ходе исследования были рассмотрены основные аспекты моделирования параметров инновационной энергоэффективной технологии переработки отходов с применением электроосмоса. Описаны модели энергоэффективной технологии, разработанные в целях повышения качества процесса и сокращения расходов субъектов экономики.

Результаты. Общий итог работы состоит в разработке теоретических и прикладных положений технологии утилизации осадков сточных вод целлюлозно-бумажного производства с применением эффекта электроосмоса. При решении поставленных задач получены следующие результаты. В ходе исследования была построена математическая модель процесса отделения влаги от пористых структур отходов ЦБП с применением электроосмоса, разработана принципиальная схема, инженерные методики и конструкторско-технологическая документация установки для обезвоживания пористых структур влажных отходов с помощью эффекта электроосмоса. Была определена методика снижения негативного воздействия отходов ЦБП на окружающую среду, путем их переработки в теплоизоляционный материал с применением электроосмотической установки. Кроме того, была разработана методика анализа соотношения затрат на энергопотребление с объемом перерабатываемых отходов ЦБП при использовании электроосмотического обезвоживания, методика оценки степени воздействия электрических полей на процесс отделения влаги от пористых материалов. Результаты лабораторных и производственных испытаний обезвоженного с помощью электроосмотической установки скопа по показателям плотности, теплопроводности, прочности при изломе и при изгибе, изменении объема при максимальном влагопоглощении, подтверждают целесообразность его использования в качестве теплоизоляционного материала. По результатам теоретических и прикладных исследований были сделаны выводы о соответствии параметров электроосмотического обезвоживания требованиям безопасности, эргономичности и экологичности.

Выводы. В целях повышения конкурентоспособности российских компаний обоснована необходимость их вхождения в мировые цепочки создания ценности в рамках различных форм сетевого взаимодействия с деловыми партнерами.

Ключевые слова: моделирование, энергоэффективный процесс, инновационная технология, электроосмос, переработка отходов, управление качеством процесса влагоотделения.

V. V. Ryzhakov, A. O. Kholudeneva

MODELING THE PARAMETERS OF AN INNOVATIVE ENERGY EFFICIENT WASTE PROCESSING TECHNOLOGY TO INCREASE THE QUALITY OF THE PROCESS AND REDUCE ECONOMIC SUBJECTS' EXPENDITURES

Abstract.

Background. The prior art includes several main ways to reduce the impact of pulp and paper industrial (PPI) sewage sludge - the built-up. In order to reduce this effect, it is necessary to dewater the sediment to a minimum value of residual moisture. Various methods are used for dehydration, but none of the known methods feature the energy efficient property and low energy consumption. To solve the problem of saving resources and means of industrial enterprises, it is proposed to use an innovative method for dehydration of PPI sewage sludge - electroosmotic dehydration.

Materials and methods. In the course of the study, the main aspects of modeling the parameters of an innovative energy-efficient technology for recycling waste using electroosmosis were considered. The article describes models of the energy-efficient technology developed to improve the quality of the process and reduce the costs for economic entities.

Results. The overall result of the work consists in development of theoretical and applied propositions for the technology of PPI sewage sludge utilization using the electroosmosis effect. The following results were obtained in solving the stated problems. In the course of the research, the authors constructed a mathematical model for the process of separating moisture from PPI porous waste structures with the use of electroosmosis, developed a schematic diagram, engineering techniques, design and technological documentation for dehydration of porous structures of wet waste using the electroosmosis effect. The researchers developed a methodology to reduce the negative impact of pulp and paper waste on the environment by processing it into a thermo-insulating material using an electroosmotic installation. In addition, they also developed a technique for analyzing the ratio of power consumption costs and volumes of recycled PPI waste when using electroosmotic dehydration and a method for estimating the impact of electric fields on the process of moisture separation from porous materials. The results of laboratory and industrial tests of the built-up dehumidified by means of an electroosmotic setting regarding density, thermal conductivity, fracture strength and bending, volume change at maximum moisture absorption confirm the expediency of using it as a heat-insulating material. Guided by the theoretical and applied research results, the authors concluded that the parameters of electroosmotic dehydration correspond to the requirements of safety, ergonomics and environmental friendliness.

Conclusions. For the purpose of increasing the competitiveness of Russian companies, the article substantiated the necessity of their introduction into the world value chains in the framework of various forms of networking with business partners.

Key words: modeling, energy-efficient process, innovative technology, electroosmosis, waste processing, quality management of moisture separation.

Введение

Из достигнутого уровня техники известны основные направления по снижению влияния осадков сточных вод целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) – скопа. В целях снижения такого влияния необходимо обезвоживание осадка до минимального значения остаточной влажности. Для обезвоживания применяются различные методы: центрифугирование, выпаривание, прессование и др., но ни один из известных методов не отличается энергоэффективностью и низкими энергозатратами. Для решения вопроса экономии ресурсов и средств промышленных предприятий предлагается использование инновационного способа обезвоживания осадков сточных вод ЦБП – электроосмотическое обезвоживание.

Но при реализации электроосмотического обезвоживания необходимо учитывать суть физических процессов, иметь соответствующее оборудование и выделять наиболее существенные параметры всех процессов данной технологии.

Материал и методика

За наиболее существенный параметр в данной технологии на основе известных публикаций [1–3] можно принять скорость движения частиц при электроосмосе

$$V_0 = \frac{\xi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot I}{\lambda \cdot \eta}, \quad (1)$$

где ξ – электрокинетический потенциал; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – диэлектрическая постоянная; I – сила тока; λ – удельная электропроводимость жидкости; η – вязкость среды

$$V_3 = \frac{E \cdot \xi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\eta}, \quad (2)$$

где E – напряженность электрокинетического поля; V_3 – средняя скорость электроосмотического потока.

Для изучения указанных процессов и их параметров (1) и (2) авторами была спроектирована лабораторная установка. Схематично лабораторную установку, предназначенную для исследования электроосмоса и электрофореза в приложениях к разработкам инновационных экологически чистых технологий утилизации отходов бумажного производства (скопа), представлена на рис. 1.

Данная установка позволяет варьировать объем (массу) исходного количества скопа, напряжения электрического поля и предварительное давление на исходный скоп через винт моментным ключом.

Результаты отдельных экспериментов [4] показывают, что процесс обезвоживания электроосмосом (рис. 2, 3) можно представить экспонентами, но экспоненты имеют различные постоянные времени. Это обусловлено изменениями скорости движения частиц при электроосмосе.

Стоит отметить, что при перезагрузке массы в установку в процессе контроля эффекта электроосмоса происходит дополнительная «потеря» мас-

сы скопа, т.е. в этом случае скоп высыхает в определенной степени конвективным путем. Эту потерю необходимо исключить при исследовании электроосмоса. Эта процедура позволит более точно оценить корреляционную связь между электрическим током, протекающим через скоп, и «потерей» его массы, вызванной электроосмосом.

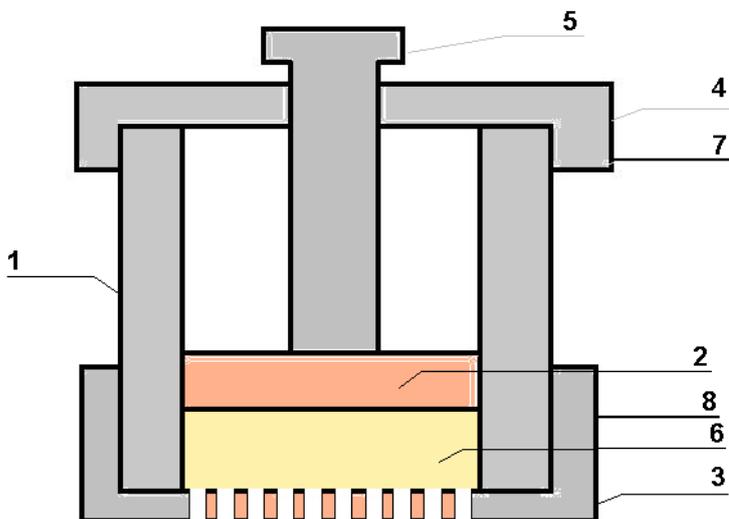


Рис. 1. Лабораторная электроосмотическая установка: 1 – корпус из изоляционного материала; 2 – подвижный электрод; 3 – неподвижный электрод с перфорацией; 4 – верхняя крышка с резьбой для винта 5, создающего (регулирующего) начальное давление (моментным ключом) сжатия скопа 6; 7, 8 – провода

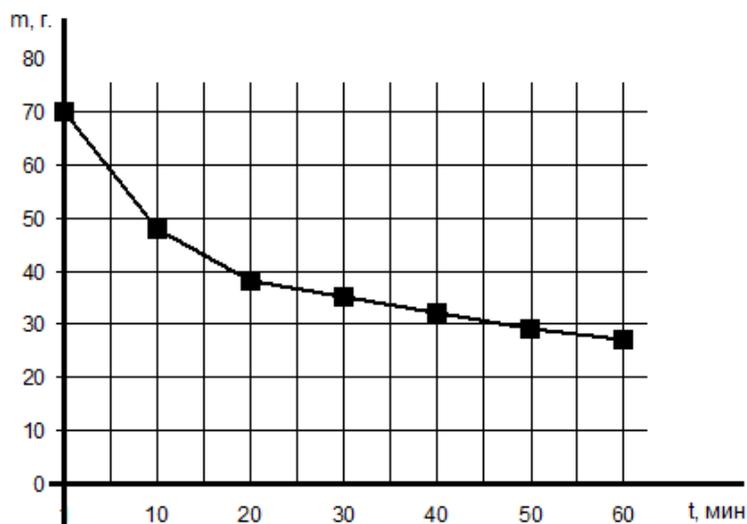


Рис. 2. График снижения массы в процессе электроосмотического обезвоживания

На электроды (2) и (3) по проводам (7) и (8) подводится электрическое напряжение (электрический ток), которое обеспечивает необходимую напряженность электрического поля, вызывающую указанные выше эффекты

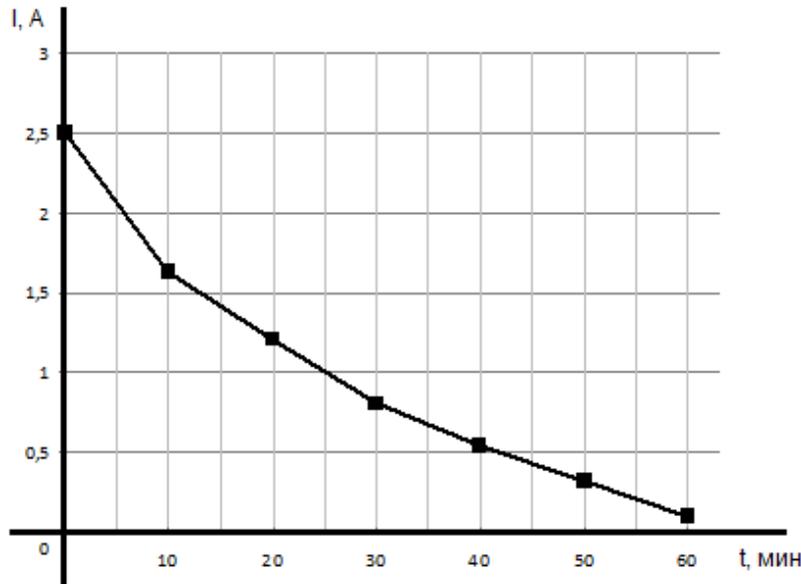


Рис. 3. График падения силы тока в процессе электроосмотического обезвоживания

После преобразования (вычета потерь массы) модель принимает вид

$$\begin{cases} m(\bar{t}_1) = \frac{m(t_1) + m(t'_1)}{2}, \\ m(\bar{t}_2) = \frac{m(t_2) + m(t'_2)}{2}, \\ \dots \end{cases} \quad (3)$$

где $m(t_1)$, $m(t_2)$ – значения остаточной массы, полученной после электроосмотического обезвоживания; $m(t'_1)$, $m(t'_2)$ – значения остаточной массы, полученной после конвекционного обезвоживания.

По данным (3) оценивается параметр модели. В качестве ее аналитического преобразования примем экспоненту

$$m_{\text{ос}}(t) = m_{\text{ос}} e^{-\frac{t}{\tau}}(t_0) \quad \text{или} \quad \delta_{\text{нос}}(t) = \frac{m_{\text{ос}}(t)}{m_{\text{ос}}(t_0)} = e^{-t/\tau},$$

где τ – неизвестный параметр.

Аналогичные расчеты следует повторить для оценивания параметров тока электроосмоса и электрофореза [5] (в последнем случае следует точнее оценить изменения массы скопа – увеличение или уменьшение).

Получим $\delta_{\text{нос}}(t_i)$ и $i_{\text{ос}}(t_i)$. С учетом этого найдем оценки корреляционных функций

$$r(\delta_{\text{нос}} i_{\text{ос}}) = \frac{k(\delta_{\text{нос}} i_{\text{ос}})}{\delta(\delta_{\text{нос}}) \delta(i_{\text{ос}})} =$$

$$= \frac{\sum \delta_{\text{нос}}(t_i) - \frac{m_{\text{нос}}(t_i)}{m_{\text{нос}}(t_0)}(i_{\text{ос}}(t_i) - I_{\text{ос}}(t_i))}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n \left[\delta_{\text{нос}}(t_i) - \frac{m_{\text{нос}}(t_i)}{m_{\text{нос}}(t_0)} \right]^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (i_{\text{ос}}(t_i) - I_{\text{ос}}(t_i))^2}}. \quad (4)$$

Данные косвенных измерений и их анализ позволяют сделать вывод, что совместно проявляется процесс электроосмоса и электрофореза. Их дифференцирование затруднено. Поэтому воспользуемся феноменологическими оценками (Постоянной времени и времени цензурирования экспериментальных данных) на основе экспериментальных данных. При эксперименте будем измерять массу скопа (m_j), соответствующую моменту времени (t_j), где j – номер временного сечения ($j \in \{0, 1, 2, \dots, n, \dots\}$).

Экспериментальные данные можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные снижения массы и падения силы тока

$j_ч$	0	0,16	0,33	0,5	0,66	0,83	1
m_j	70	48	38	35	32	29	27
i_j	2,5	1,63	1,21	0,8	0,53	0,31	0,09

Экспериментальные данные позволяют в качестве моделей, выражающих массу скопа, как функцию времени сушки и значение электрического тока (при определенных начальных условиях) экспонентами, то в качестве модели процесса сушки (электроосмоса) примем экспоненту

$$m(t_j) = m_0 \cdot e^{-\frac{t_j}{\tau_m}} \quad (5)$$

и

$$i(t_j) = i_0 \cdot e^{-\frac{t_j}{\tau_i}}. \quad (5a)$$

В связи с тем, что массы исходных порций скопа в установке могут меняться, перейдем от предметных шкал к универсальным:

$$\delta_m(t_j) = e^{-\frac{t_j}{\tau_m}}, \quad (6)$$

$$\delta_i(t_j) = e^{-\frac{t_j}{\tau_i}}. \quad (6a)$$

Основные параметры в этих моделях – постоянные времени τ_m и τ_i .

Для того, чтобы воспользоваться известными правилами МНК, модели (6) и (6a) подвергнем логарифмизации:

$$\ln \delta_m(t_j) \cdot \tau_m = -t_j; \quad (7)$$

$$\ln \delta_i(t_j) \cdot \tau_i = -t_j. \quad (7a)$$

Тогда можем принять $S^2 = \sum (t_j - \ln \delta_m(t_j) \cdot \tau_m)^2$;

$$S_m^2 = \sum_{j=0}^n [t_j + \ln \delta_m(t_j) \cdot \tau_m] \cdot \ln \delta_m(t_j) = 0; \quad (8)$$

$$\sum_{j=0}^n [t_j + \ln \delta_i(t_j) \cdot \tau_i] \cdot \ln \delta_i(t_j) = 0. \quad (8a)$$

После несложных преобразований получим

$$\tau_m = \frac{\sum_{j=0}^n (t_j \cdot \ln \delta_m(t_j))}{\sum_{j=0}^n (\ln \delta_m(t_j))^2}; \quad (9)$$

$$\tau_m = \frac{\sum_{j=0}^n (t_j \cdot \ln \delta_m(t_j))}{\sum_{j=0}^n (\ln \delta_m(t_j))^2}. \quad (9a)$$

Результаты

Сравнительный анализ статистических оценок τ_m^* и τ_i^* показывает, что они не совпадают $\tau_i^* < \tau_m^*$.

Последнее свидетельствует о том, что сушка скопа продолжается и после того, когда эффект электроосмоса уже практически не отмечается прибором с определенного момента времени t_c : $i(t) \approx 0$ при $t \geq t_c$.

Сушка может продолжаться по причине того, что масса скопа накапливала энергию, которая превратилась в джоулево тепло. Эту энергию можно оценить в виде интеграла

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{t_c} \frac{v_n I_0 e^{-\frac{t}{\tau_i^*}} dt}{t_c} = \tau_i^* v_n I_0 \int_0^{t_c} e^{-\frac{t}{\tau_i^*}} d\left(-\frac{t}{\tau_i^*}\right) = \\ &= \tau_i^* v_n I_0 e^{-\frac{t}{\tau_i^*}} \Big|_0^{t_c} = \tau_i^* v_n I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i^*}}\right) = 58,61 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (10)$$

или в переводе в джоули: $W = 210,996$ кДж, или в виде удельных затрат $\delta_W = \frac{W}{m_0} = 3014228$ Дж/кг ($\text{м}^2/\text{с}^2$).

Эта энергия, накопленная в скопе, в элементах конструкции установки, позволяет продолжить пассивный режим сушки.

Сушка остаточной влаги в скопе (после окончания процесса электроосмоса) в термоскафу при температуре равной 120°C имеет другой характер (рис. 4).

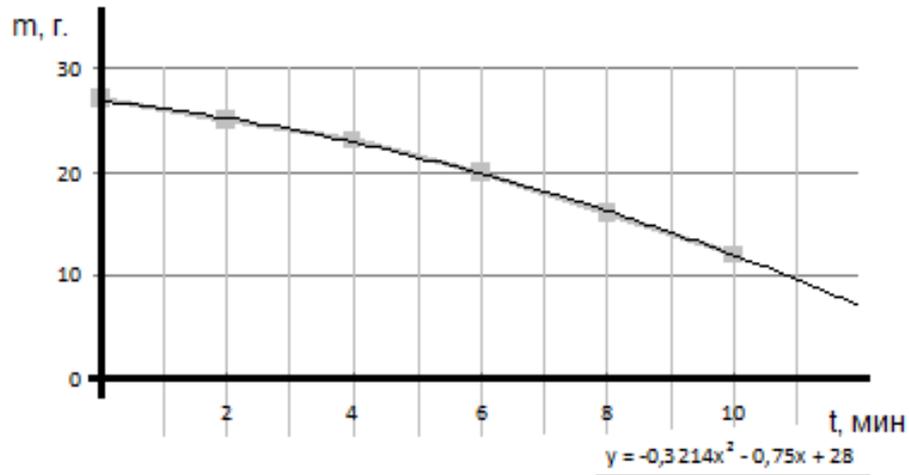


Рис. 4. График снижения массы в процессе досушки в тепловом шкафу

Из него следует, что здесь (после $t \geq t_c$) более подходит модель в виде параболической кривой

$$\tilde{\delta}_m^{(0)} = a + bt + ct^2. \quad (11)$$

По экспериментальным данным (табл. 1), по методу наименьших квадратов (МНК)

$$S = \sum_i \left(m_i - (a + bt_i + ct_i^2) \right)^2 \quad (12)$$

из условий

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b} = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial c} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

следует $a = -0,3214$; $b = -0,75$; $c = 28$.

После этого следует определить коэффициент детерминации модели δ_m^0

$$n_{\delta} = \sqrt{1 - \frac{\sum_i (\delta_m(t_i) - \tilde{\delta}_m(t_i))^2}{\sum_i (\delta_m(t_i) - \bar{\delta}_m(t))^2}}. \quad (14)$$

Тот факт, что $\tau_m^* < \tau_i^*$ не дает основания измерять (контролировать) только ток $i(t_i)$ и по этим данным определять постоянную времени τ_m . Но если $t = t_c$ влажность скопа \leq допустимого значения, то из уравнения

$$[\delta_{\delta_m}] = e^{-t_c/\tau_m^*} = \delta_{mc}. \quad (15)$$

Найдем δ_{mc} и с учетом этого оценим процент снижения массы – сушки скопа и остаточную влажность

$$\delta_c = \frac{\delta_{m_0} - \delta_{mc}}{\delta_{m_0}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

$$\delta_0 = \delta_{нач} - \delta_c. \quad (17)$$

При $\delta_0 < [\delta]$ процесс электроосмоса приостанавливается. Уравнение позволяет оценить остаточную влажность после электроосмоса, если воспользоваться процедурой

$$\delta_k = \frac{\delta_{m_0} - \delta_m^{(0)}(t = t_k)}{\delta_{m_0}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Если $\delta_k < [\delta]$, то это – дополнительное подтверждение достаточности сушки скопа электроосмосом.

Обсуждение

После этого можем говорить, что при данной конфигурации установки длительность процесса формирования можно контролировать по данным наблюдения $i(t_i)$: при $i(t_i) = 0$, $t = t_c$ процесс может быть приостановлен. Это значительно сократит трудозатраты: скоп не нужно выгружать, взвешивать и вновь загружать.

Для подтверждения правильности этого методического приема необходимо провести дополнительные статистические исследования оценок τ_m и τ_i : их состоятельность, несмещаемость и эффективность.

Выводы

Общий итог работы состоит в разработке теоретических и прикладных положений технологии утилизации осадков сточных вод целлюлозно-

бумажного производства с применением эффекта электроосмоса. При решении поставленных задач получены следующие результаты.

В ходе исследования была построена математическая модель процесса отделения влаги от пористых структур отходов ЦБП с применением электроосмоса, разработана принципиальная схема, инженерные методики и конструкторско-технологическая документация установки для обезвоживания пористых структур влажных отходов при помощи эффекта электроосмоса. Была определена методика снижения негативного воздействия отходов ЦБП на окружающую среду, путем их переработки в теплоизоляционный материал с применением электроосмотической установки.

Кроме того, была разработана методика анализа соотношения затрат на энергопотребление с объемом перерабатываемых отходов ЦБП при использовании электроосмотического обезвоживания, методика оценки степени воздействия электрических полей на процесс отделения влаги от пористых материалов.

Результаты лабораторных и производственных испытаний обезвоженного с помощью электроосмотической установки скопа по показателям плотности, теплопроводности, прочности при изломе и при изгибе, изменении объема при максимальном влагопоглощении, подтверждают целесообразность его использования в качестве теплоизоляционного материала.

По результатам теоретических и прикладных исследований были сделаны выводы о соответствии параметров электроосмотического обезвоживания требованиям безопасности, эргономичности и экологичности.

Библиографический список

1. **Холуденева, А. О.** Теоретические обоснования возможности внедрения автоматизированной информационно-измерительной системы управления процессом электроосмоса / А. О. Холуденева // Информационные технологии в экономических и технических задачах : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПензГТУ, 2016. – С. 197–200.
2. **Рыжаков, В. В.** Обоснование возможности применения электроосмоса для снижения влажности пористых структур отходов / В. В. Рыжаков, А. О. Холуденева // Современные проблемы развития техники и технологий : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПензГТУ, 2016. – С. 188–191.
3. **Рыжаков, В. В.** Применение электрокинетических процессов для снижения массы отходов пористой структуры / В. В. Рыжаков, А. О. Холуденева, М. В. Рыжаков // Научно-методический журнал XXI век: итоги прошлого проблемы настоящего плюс. Сер.: Экология. – Пенза : ПензГТУ, 2016. – С. 63–68.
4. **Рыжаков, В. В.** Разработка технологии производства утеплительного материала путем рециклинга отходов бумажного производства / В. В. Рыжаков, А. О. Холуденева // Мавлютовские чтения : сб. тр. Рос. науч.-техн. конф. – Уфа : УГАТУ, 2016. – С. 124–127.
5. Теоретические обоснования возможности применения электроосмоса для обезвоживания влажных отходов бумажного производства / В. В. Рыжаков, А. О. Холуденева, И. М. Портнова, Д. А. Бармин, В. В. Шагалин // Современные информационные технологии в управлении качеством : сб. ст. IV Междунар. науч.-прикладной конф. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2015. – С. 84–87.

References

1. Kholudeneva A. O. *Informatsionnye tekhnologii v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh zadachakh : sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in economic and technical tasks: proceedings of an International scientific and practical conference]. Penza: Izd-vo PenzGTU, 2016, pp. 197–200.
2. Ryzhakov V. V., Kholudeneva A. O. *Sovremennye problemy razvitiya tekhniki i tekhnologii: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern problems of technological development: proceedings of an International scientific and practical conference]. Penza: Izd-vo PenzGTU, 2016, pp. 188–191.
3. Ryzhakov V. V., Kholudeneva A. O., Ryzhakov M. V. *Nauchno-metodicheskiy zhurnal XXI vek: itogi proshlogo problemy nastoyashchego plyus. Ser.: Ekologiya* [Scientific and methodological journal XXI century: results of the past, problems of the present plus. Series: Ecology]. Penza: PenzGTU, 2016, pp. 63–68.
4. Ryzhakov V. V., Kholudeneva A. O. *Mavltyutovskie chteniya: sb. tr. Ros. nauch.-tekhn. konf.* [Mavltyutovskie reading: proceedings of an Russian scientific and technical conference]. Ufa: UGATU, 2016, pp. 124–127.
5. Ryzhakov V. V., Kholudeneva A. O., Portnova I. M., Barmin D. A., Shagalin V. V. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v upravlenii kachestvom: sb. st. IV Mezhdunar. nauch.-prikladnoy konf.* [Modern information technologies in quality management: proceedings of IV International scientific and applied conference]. Penza: Privolzhskiy dom znaniy, 2015, pp. 84–87.

Рыжаков Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра технического управления
качеством, Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: rvv@penzgtu.ru

Ryzhakov Viktor Vasil'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department technical quality
management, Penza State Technological
University (1a/11 Baydukova lane/
Gagarina street, Penza, Russia)

Холуденева Алина Олеговна

ассистент, кафедра технического
управления качеством, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза, проезд
Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: linakholudeneva@mail.ru

Kholudeneva Alina Olegovna

Assistant, sub-department technical
quality management, Penza State
Technological University
(1a/11 Baydukova lane/Gagarina
street, Penza, Russia)

УДК 53.043, 338.46:628.4

Рыжаков, В. В.

Моделирование параметров инновационной энергоэффективной технологии переработки отходов в целях повышения качества процесса и сокращения расходов субъектов экономики / В. В. Рыжаков, А. О. Холуденева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Экономические науки. – 2017. – № 2 (6). – С. 107–117. DOI 10.21685/2309-2874-2017-2-12