

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ АЗОПИГМЕНТОВ НА ВАЛЬЦЕЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКЕ

**К. В. Брянкин, А. А. Дегтярев, Д. А. Богачев, А. И. Бельков**

*Кафедра «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;  
htov@mail.tambov.ru*

**Ключевые слова:** вальцеленточная сушилка; влажность; воздухопереток по камерам сушилки; пигмент красный FGR; сушильный агент; термическая чувствительность; циклично-импульсный режим.

**Аннотация:** Определены основные факторы, влияющие на формирование качественных характеристик органических пигментов на примере пигмента красного FGR. Для обезвоживания пигмента, обладающего термочувствительными свойствами, предложен метод конвективной сушки в слое, обеспечивающий более «мягкие» условия ведения процесса, возможность создания секционированного корпуса аппарата и тем самым оптимального временного профиля процесса сушки. Исследованы тепловой и гидродинамический режимы в каждой камере и кинетические характеристики процесса сушки пигмента с использованием вальцеленточной сушилки. На основе полученных экспериментальных данных предложены технологические решения, позволяющие интенсифицировать процесс и повысить его энергоэффективность. Суть технологических решений состоит в использовании циклично-импульсного подвода сушильного агента и изменении схемы воздухоперетоков по камерам сушилки, что позволило: увеличить производительность сушилки по сухому продукту на 80 % при обеспечении нормативных показателей по влажности конечного продукта; снизить потребление пара на единицу массы сухого продукта на 42 %; обеспечить удаление сорбционно-связанной влаги с поверхности частиц пигмента без достижения порогового значения подведенной к системе энергии, которая может привести к термодеструкции целевого вещества.

---

### Введение

Печатным краскам в полиграфии всегда уделялось большое внимание, потребность в них непрерывно растет. С развитием полиграфических технологий ужесточаются требования к качеству красок. Современная офсетная краска должна обладать свойствами, позволяющими печатать тонким слоем, обладать хорошей адгезией к бумаге, обеспечивать четкое изображение на оттиске и не расплываться на бумаге, то есть иметь гидрофобные свойства, обеспечивающие минимальное эмульгирование краски с увлажняющим раствором, прочно и быстро закрепляться на оттиске.

Цвет офсетной краски и его интенсивность формируется пигментным наполнителем, вводимым в пленкообразующее наряду с различными добавками, регулируемыми вязкостью, адгезионными свойствами, скоростью образования твердой пленки [1].

При производстве красных офсетных красок широкое распространение получил органический пигмент красный FGR обладающий высокой колористической концентрацией, хорошей адгезией к фенолформальдегидным, пентафталевым и акриловым пленкообразующим.

Как показали исследования [2] частицы пигмента красного FGR проявляют гидрофобные свойства и хорошую смачиваемость органическими жидкостями, однако при наличии координационного слоя ионов водорастворимых примесей вокруг частиц пигмента мицелла проявляет гидрофильность и малую смачиваемость органическими жидкостями. Обнаруженный эффект позволяет предположить, что выпускная форма пигмента красного FGR для фенолформальдегидных, пентафталевых пленкообразующих не должна содержать координационный слой ионов водорастворимых примесей вокруг частиц пигмента. Разрушение этого слоя возможно удалением из пигмента влаги, которая является средой образования ионов, и часть ее координирована вокруг частиц пигмента [3]. В связи с этим требования к такому показателю качества пигментов, как конечная влажность, снизилась с традиционных 5 – 6 до 0,5 – 1 %.

Согласно проведенным исследованиям [2] частицы пигмента красного FGR имеют игольчатую форму с размерами 0,2...229 мкм, что при фильтрации приводит к формированию слоя осадка с влажностью порядка 71 – 73 %.

Процесс удаления влаги из осадка пигмента красного FGR осуществляют на сушилке вальцеленточной (СВЛ) [2], которая относится к сушилкам с низкой интенсивностью влагосъема [6], что с учетом высокой начальной влажности осадка и возросших требований по конечной влажности приводит к снижению производительности установки и увеличению потерь тепла в окружающую среду.

Для разработки технических решений по интенсификации процесса сушки пигмента красного FGR потребовались исследования теплового и гидродинамического режимов в каждой камере и кинетических характеристик процесса сушки.

### Эксперимент, результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на действующей вальцеленточной сушилке ОАО «Пигмент», г. Тамбов. Схема СВЛ и результаты изучения теплового и гидродинамического режимов и кинетики сушки приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

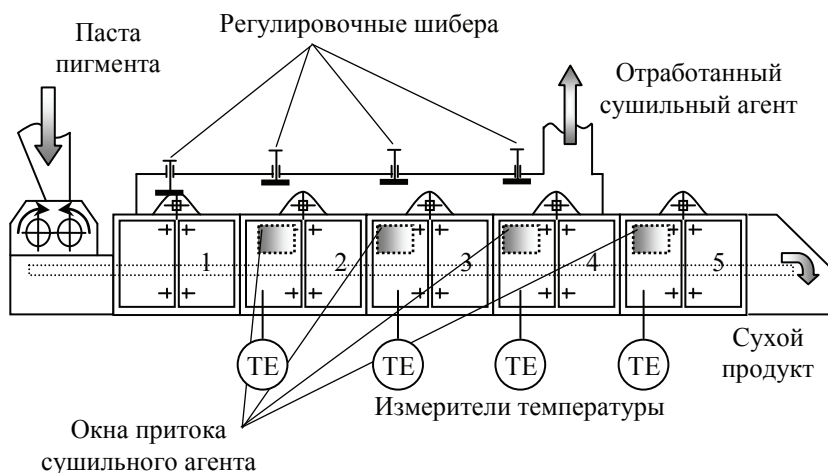
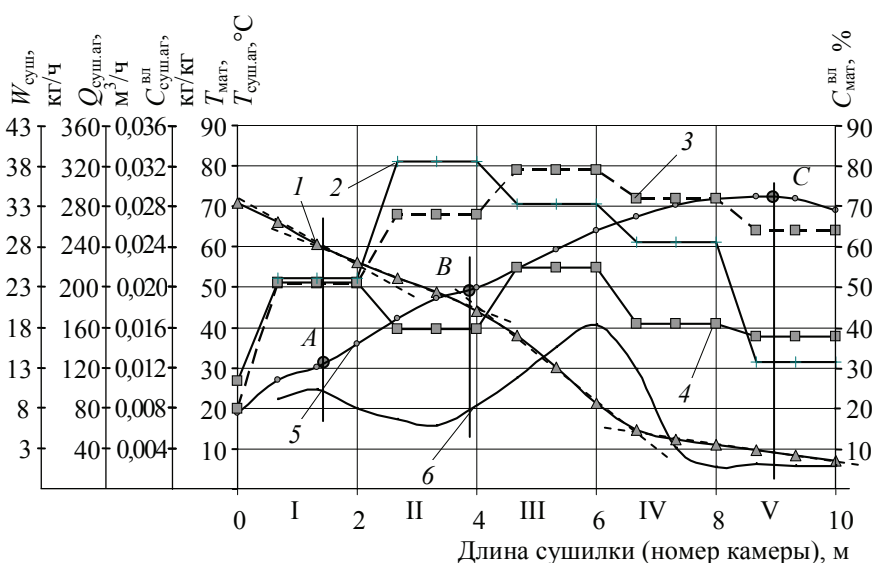


Рис. 1. Схема сушилки вальцеленточной



**Рис. 2. Технологические режимы сушки пигмента красного FGR на СВЛ:**

- 1 – влажность материала  $C_{\text{мат}}^{\text{вл}}$ ; 2 – расход сушильного агента  $Q_{\text{суш. аг}}$ ;  
 3 – температура сушильного агента  $T_{\text{суш. аг}}$ ; 4 – влажность сушильного агента  $C_{\text{суш. аг}}^{\text{вл}}$ ;  
 5 – температура материала  $T_{\text{мат}}$ ; 6 – скорость удаления влаги  $W_{\text{суш}}$

Анализ полученных результатов позволил определить следующее.

1. Сушильный агент в камерах сушилки используется с низкой эффективностью (в камере I составляет 59 % от теоретически возможного, II – 43 %, III – 66 %, IV – 71 %, V – 84 %).

2. Термовлажностная зависимость (см. рис. 2, кривые 1 и 5) сушки пигмента красного FGR относится к пятому кинетическому типу по классификации В. И. Коновалова [7], на температурной кривой температурные площадки переходят в перегибы (точки A, B), первый период сушки отсутствует. Такой характер изменения температуры высушиваемого материала можно объяснить формированием плотной корки, затрудняющей дальнейшее удаление влаги.

3. В камере I обеспечивается снижение влажности с 71 до 55 %; II – скорость удаления влаги падает, что приводит к снижению влажности лишь с 55 до 44 %; III – скорость удаления влаги максимальна, влажность пигмента изменяется с 44 до 21 %. В камерах IV и V наблюдается монотонное падение скорости процесса; влажность на выходе из этих камер составляет 11 и 7 % соответственно.

Такая кинетическая картина процесса сушки формируется в результате высокой начальной влажности высушиваемого продукта, высокой дисперсности частиц пигмента и наличия сорбционной связи «частица пигмента – ион водорастворимой примеси – вода» [3]. В камере I из-за высокой начальной влажности осадок малопроницаем, что затрудняет его продувку горячим воздухом. Наличие большого количества поверхностной влаги, располагаемой в диффузионном слое, приводит к образованию корки на поверхности высушиваемого материала. В камере II из-за коркообразования удаление влаги из пасты пигмента затруднено; III – происходит повышение температуры высушиваемого материала и увеличение парциального давления во внутренних порах, разрушение поверхностной корки и интенсификация процесса сушки. При этом большое количество тепла, подводимое с сушильным агентом, идет на испарение влаги, а прогрев материала незначителен. Низкая температура высушиваемого материала не позволяет в камере IV обеспечить эффективное удаление сорбционно-связанной влаги.

Для интенсификации процесса сушки необходимо: увеличить температуру сушильного агента по камерам до максимально возможной, обеспечивающей прогрев высушиваемого материала до температуры 85...100 °С; изменить схему воздухопотока в сушилке таким образом, чтобы обеспечить максимальный прогрев высушиваемого материала в камере I при минимальном эффекте коркообразования; обеспечить основное удаление диффузионной влаги в камере II.

4. Отрезок *AB* на кривой температуры сушильного агента при стандартных воздухопотоках демонстрирует снижение скорости удаления влаги (см. рис. 2, кривые 2, 6), что может быть объяснено образованием поверхностной корки, препятствующей удалению влаги. Тогда отрезок *AB* на кривой 5, соответствующий повышению температуры материала с 30 до 49 °С и удалению 12 % влаги, характеризует процессы накопления энергии в материале, необходимой для преодоления влагой образовавшейся корки и ее удаление с поверхностных слоев материала (увеличение толщины корки), скорость удаления на данном отрезке снижается с 9,2 до 7,2 кг/ч. Дальнейшее увеличение температуры с 49 до 64 °С (отрезок *BC*) приводит к разрушению поверхностной корки образовавшейся парожидкостной смесью в капиллярах материала, – на этом отрезке удаляется 26 % влаги, при этом скорость удаления влаги в точке *B* увеличивается до 9,5 кг/ч и в дальнейшем возрастает до 18,7 кг/ч. В камере IV происходит удаление адсорбционно и молекулярно связанной влаги, этот отрезок характерен резким снижением скорости сушки сначала до 4,7 кг/ч, а затем наступает период постоянной скорости сушки с величиной 2,7 кг/ч, изменение температуры слоя незначительное 8 °С, на этом отрезке удаляется 10,5 % влаги.

5. На основании данных по изменению влажности, температуры и расхода сушильного агента и материала предложены следующие изменения в схему воздухопотоков в СВЛ и температурного режима: необходимо снизить количество удаляемого сушильного агента из камер I, IV, V; увеличить приток свежего сушильного агента в камеры II, V и обеспечить воздухопоток из V в IV и из IV в III камеры; требуется повысить температуру в камерах I и II до максимально возможной; III, IV – до температуры, обеспечивающей сохранение целевого компонента (с учетом термолabileльных свойств пигмента – 85...95 °С).

6. Для устранения процесса коркообразования необходимо снизить влажность пасты, подаваемой в камеру I, что можно достичь повышением эффективности фильтрации или установкой обогреваемых вальцов.

Изменение схемы воздухопотоков можно осуществить регулировкой шиберов сброса отработанного сушильного агента и притока свежего воздуха по камерам (см. рис. 1).

Результаты экспериментальных исследований кинетики процесса сушки пигмента красного FGR на СВЛ с оптимизированными режимами воздухопотока представлены на рис. 3.

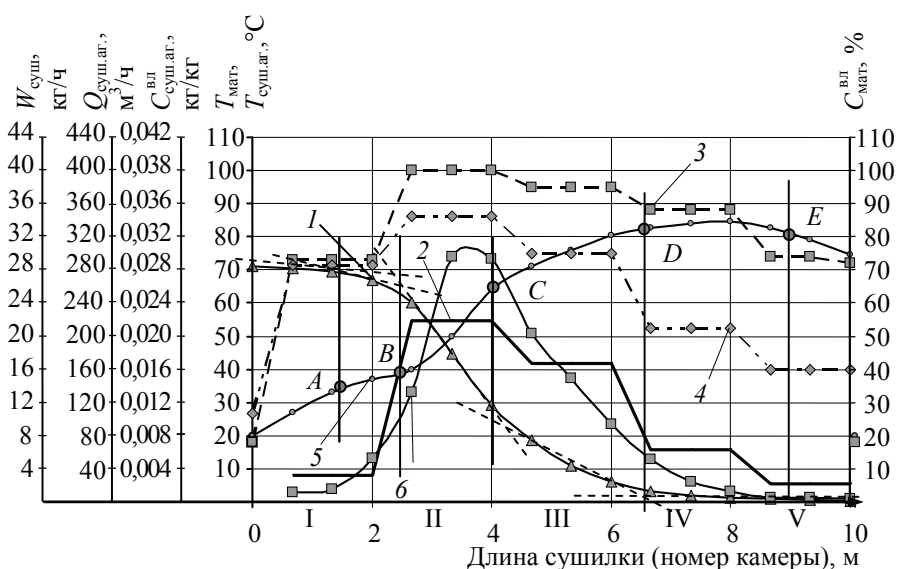
Сопоставление полученных результатов с исходными данными (см. рис. 2) позволило определить следующее:

1) конечная влажность материала снизилась с 7,1 до 0,5 % при сохранении производительности сушилки;

2) расход сушильного агента сократился с 12000 до 4900 м<sup>3</sup>/ч, при этом удельные энергозатраты на процесс сушки сократились с 29100 до 17900 кДж/кг;

3) скорость удаления влаги в камерах I, II монотонно возрастает до 32 кг/ч в конце камеры II и снижается до 0,62 кг/ч в конце камеры V;

4) в результате изменения температурного режима удалось увеличить среднюю скорость удаления влаги в камере II с 8 до 32 кг/ч; на отрезке *AB* – с 5,6 до 14,3 кг/ч;



**Рис. 3. Кинетика сушки пигмента красного FGR на СВЛ с оптимально настроенным воздухоперетоком и тепловым режимом:**

- 1 – влажность материала  $C_{\text{мат}}^{\text{вл}}$ ; 2 – расход сушильного агента  $Q_{\text{суш. аг.}}$ ;  
 3 – температура сушильного агента  $T_{\text{суш. аг.}}$ ; 4 – влажность сушильного агента  $C_{\text{суш. аг.}}^{\text{вл}}$ ;  
 5 – температура материала  $T_{\text{мат.}}$ ; 6 – скорость удаления влаги  $W_{\text{суш}}$

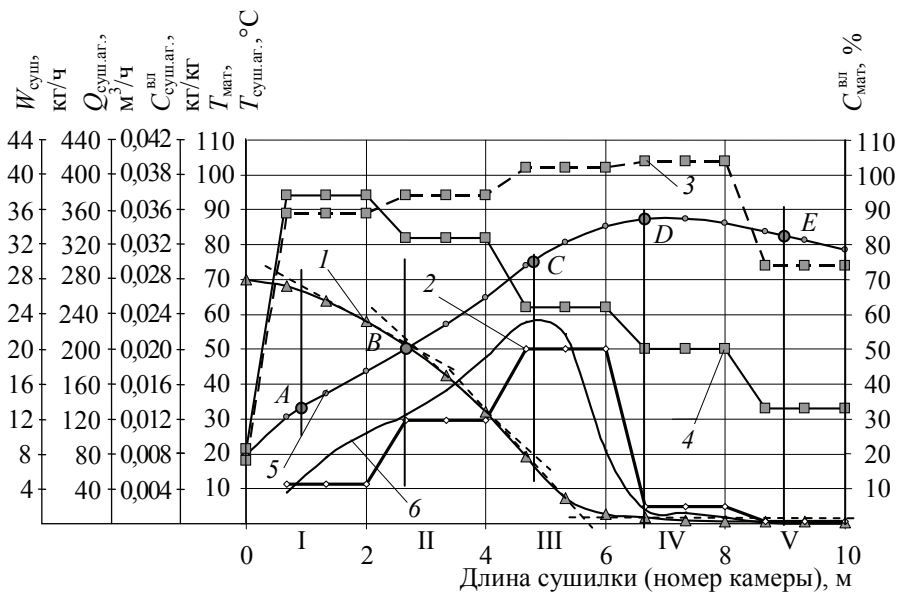
на отрезке *BC* – с 14,3 до 32 кг/ч (на этом участке удаляются остатки поверхностной влаги и влаги, находящейся в капиллярах материала); на участке *CD* происходит удаление остатков влаги из капилляров и удаление сорбционно-связанной влаги, скорость сушки падает до 2,7 кг/ч (удаляется 21 % влаги); на отрезке *DE* скорость сушки падает до 0,45 кг/ч, на этом участке удаляется 0,8 % сорбционно-связанной влаги.

Несмотря на достигнутый результат по влажности высушиваемого материала СВЛ по-прежнему обладает рядом недостатков, среди которых в первую очередь следует выделить низкую производительность по сухому продукту, высокие удельные энергозатраты (17900 кДж/кг), низкую эффективность использования сушильного агента.

Для устранения перечисленных недостатков предлагается циклично-импульсный способ отвода отработанного сушильного агента из СВЛ, при котором режим отвода отработанного сушильного агента сменяется режимом подведения тепла к высушиваемому материалу.

Определение времени составляющих цикла, отвода сушильного агента и интенсивного теплообмена между сушильным агентом и материалом осуществлялось следующим образом: останавливалась работа вытяжного вентилятора при непрерывной работе рециркуляционных вентиляторов (составляющая цикла подведения тепла к материалу); время этого цикла определялось по достижению максимального значения влажности и температуры рециркуляционного сушильного агента в камерах; далее включался вытяжной вентилятор (составляющая цикла отвода отработанного сушильного агента), время этого цикла определялось по достижению минимума значения влажности и температуры рециркуляционного сушильного агента в камерах.

По результатам анализа экспериментальных данных предложены следующие технологические режимы цикла: 4 мин вытяжной вентилятор выключен, 12 мин включен.



**Рис. 4. Кинетика сушки пигмента красного FGR на СВЛ с цикличным режимом отвода сушильного агента:**

- 1 – влажность материала  $C_{\text{мат}}^{\text{вл}}$ ; 2 – расход сушильного агента  $Q_{\text{суш. аг.}}$ ;  
 3 – температура сушильного агента  $T_{\text{суш. аг.}}$ ; 4 – влажность сушильного агента  $C_{\text{суш. аг.}}^{\text{вл}}$ ;  
 5 – температура материала  $T_{\text{мат}}$ ; 6 – скорость удаления влаги  $W_{\text{суш}}$

Экспериментальные данные кинетики сушки пигмента красного FGR на СВЛ с цикличным режимом отвода сушильного агента представлены на рис. 4.

Анализ полученных данных позволил определить следующее.

1. Расход сушильного агента снизился с 4900 до 3860 м<sup>3</sup>/ч, при этом удельные энергозатраты на сушку уменьшились с 17900 до 13300 кДж/кг.

2. Применение цикличного режима позволило повысить температуру сушильного агента по камере I на 16 °С и высушиваемого материала на 4,5 °С, влажность материала в конце камеры I снижается с 65 до 57 % масс; по камере II – температура сушильного агента снизилась на 6 °С, материала выросла на 5,5 °С; влажность материала в конце камеры II не изменяется; по камере III температура сушильного агента выросла на 7 °С, материала на 4 °С; влажность материала в конце камеры III снижается с 4,5 до 3 %; повышение температуры по камере IV составило 16 °С, материала 3 °С, влажность материала 1,0 %; температурные режимы в камере V не изменились, влажность снизилась на 0,15 %.

3. Прогрев материала в камере I при циклично-импульсном режиме отвода сушильного агента ускорился на 42 %. На отрезке *AB* скорость прогрева материала увеличилась на 52 %, при этом материал прогревается до 49 °С, скорость удаления влаги составила 12...14,3 кг/ч, что сопровождается удалением 17 % влаги.

В точке *B* скорость прогрева материала (кривая 5) несколько возрастает, на отрезке *BC* удаляется 28 % влаги при скорости удаления влаги (кривая 6) до 26 кг/ч; на этом участке происходит удаление влаги из капилляров материала и остаточной поверхностной влаги. Отрезок *CD* отражает период падающей скорости сушки (с 26 до 0,92 кг/ч), при этом удаляется 17 % влаги (остаточная влажность материала 1 %) – преимущественно сорбционно-связанной и капиллярной. На отрезке *DE* удаляются остатки сорбционно-связанной влаги с 1 до 0,45 %, при этом скорость сушки падает с 0,14 до 0,04 кг/ч.

## Выводы

Совмещение циклического способа отвода сушильного агента и изменение режима воздухопотока позволяет:

- увеличить производительность СВЛ по сухому продукту на 80 % при обеспечении нормативных показателей по влажности конечного продукта;
- снизить энергозатраты (потребление пара) на единицу массы сухого продукта на 42 %.
- обеспечить удаление сорбционно-связанной влаги с поверхности частиц пигмента без достижения порогового значения подведенной к системе энергии, которая может привести к термодеструкции целевого вещества.

### Список литературы

1. Гоголадзе, И. А. Изучение свойств офсетных гибридных красок и сравнение свойств двух триад офсетных гибридных красок, произведенных фирмами Brancher (Франция) и INX (США) / И. А. Гоголадзе, И. Ю. Гусева // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы полиграфии и изд. дела. – 2011. – № 2. – С. 027 – 031.
2. Интенсификация процесса сушки пастообразных материалов на вальцеленточной сушилке / П. А. Фефелов [и др.] / VII науч. конф. ТГТУ : пленар. докл. и тез. стендовых докл. / Тамб. гос. тех. ун-т. – Тамбов, 2002. – Ч. 1. – С. 148.
3. Брянкин, К. В. Влияние водорастворимых примесей на кинетику сушки органических пигментов / К. В. Брянкин, А. И. Леонтьева, Д. А. Богачев // Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-2014) (23 – 26 сент. 2014, Иваново, Россия) : сб. тр. (секц. докл.) : в 2 т. / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2014. – Т. 1. – С. 210 – 213.
4. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 471 с.
5. Леонтьева, А. И. Кинетика, технология и комплексное аппаратурно-технологическое совершенствование заключительных стадий производства полупродуктов органических красителей (выделение, фильтрование, удаление примесей, сушка : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 : 05.17.04 / Леонтьева Альбина Ивановна. – Тамбов, 2005. – 402 с.
6. Леонтьева, А. И. Исследование процесса сушки полупродуктов органических красителей под вакуумом / А. И. Леонтьева, К. В. Брянкин, А. А. Дегтярев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 326 – 331.
7. Коновалов, В. И. Базовые кинетические характеристики массообменных процессов / В. И. Коновалов // Журн. приклад. химии. – 1986. – Т. 59, № 9. – С. 2096 – 2107.

---

## Technological Modes of Drying Temperature-Dependent Azo Pigments in Roller Band Dryer

K. V. Bryankin, A. A. Degtyarev, D. A. Bogachev, A. I. Belkov

*Department “Chemistry and Chemical Engineering”, TSTU;  
htov@mail.tambov.ru*

**Keywords:** air flow in the dryer cells; cyclic-pulse mode; drying agent; moisture; FGR pigment red; thermal sensitivity; roller band dryer.

**Abstract:** We determined the main factors influencing the formation of the qualitative characteristics of organic pigments on the example of FGR Pigment Red. We proposed a method for convective drying in the layer for dehydration of the pigment with heat-sensitive properties. This method provides “soft” conditions of the process, possibility of creating a partitioned case of the device, and thus the optimal time profile of the drying process. The process of pigment drying was studied using a roller band dryer in thermal and hydrodynamic conditions in each chamber; kinetic characteristics of the drying process were examined. Using the experimental data we propose technological solutions to intensify the process and improve its energy efficiency. The technology consists in the use of cyclic-pulse supply of the drying agent and modification of the air flow mode in the dryer cells. The technology increased the capacity of the dryer for the dry product by 80 %, while maintaining the regulatory requirements for the final product moisture; reduced the steam consumption per unit mass of dry product by 42 %, and ensured the removal of moisture sorption coupled with the pigment particle surface without reaching the threshold value of energy supplied to the system, which may lead to thermal destruction of the target substance.

### References

1. Gogoladze, I.A., Guseva I.Yu. *Proceedings of the institutions of higher education. Issues of the graphic arts and publishing*, 2011, no. 2, pp. 027-031.
2. Fefelov, P.A., Bryankin K.V., Chuprunov S.Yu., Orekhov V.S. *VII nauchnaya konferentsiya TGTU* (VII Scientific Conference TSTU), Plenary Reports and Abstracts of Poster Presentations, Tambov, 2002, part 1, p. 148.
3. Bryankin K.V., Leontyeva A.I., Bogachev D.A. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy resurso- i energosberegayushchikh tekhnologii v promyshlennosti i APK» (PRET-2014)* (International Scientific and Technical Conference “Problems of Resources and Energy Saving Technologies in the Industry And Agricultural Complex” (PRET-2014)), September 23-26, 2014, Ivanovo, Russia, Proceedings (oral presentations), Published by Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia, 2014, vol. 1 of 2, pp. 210-213.
4. Lykov A.V. *Teoriya sushki* (Theory of Drying), Moscow: Energiya, 1968, 471 p.
5. Leontyeva A.I. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2005, 402 p.
6. Leontyeva A.I., Bryankin K.V., Degtyarev A.A. *Transaction of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 326-331.
7. Konovalov V.I. *Zhurnal prikladnoi khimii*, 1986, vol. 59, no. 9, pp. 2096-2107.

---

## Technologische Regimes des Trocknens der Thermolabilazopigmente auf dem Walzenbandtrockner

**Zusammenfassung:** Es sind die Hauptfaktoren, die die Bildung der qualitativen Charakteristiken der organischen Pigmente am Beispiel des Pigmentes von roten FGR beeinflussen, bestimmt. Für die Entwässerung des Pigmentes, das über die thermoempfindlichen Eigenschaften verfügt, ist die Methode des konvektiven Trocknens in der Schicht, die die “weicheren” Bedingungen der Führung des Prozesses, die Möglichkeit der Bildung des aufgeteilten Körpers des Apparates und dadurch des optimalen vorübergehenden Profils des Prozesses des Trocknens versorgt, vorgeschlagen. Es ist der Prozess des Trocknens des Pigmentes unter Ausnutzung des Walzenbandtrockners, einschließlich der thermischen und hydrodynamischen Regimes in jeder Kamera und der kinetischen Charakteristiken des Prozesses des Trocknens, untersucht. Aufgrund der erhaltenen experimentalen Daten sind die technologischen



Lösungen, die den Prozess zu intensivieren und Energieeffektivität zu erhöhen erlauben, vorgeschlagen. Das Wesen der technologischen Lösungen besteht in der Nutzung der zyklischen impulsartigen Zufuhr des Trockenagenten und der Veränderung des Schemas der Luftüberströmungen in den Kameron des Trockners, was zugelassen hat, die Produktivität des Trockners nach dem trockenen Produkt auf 80 % bei der Versorgung der normativen Kennziffern nach der Feuchtigkeit des Finalproduktes zu vergrößern; den Verbrauch des Dampfes auf die Einheit der Masse des trockenen Produktes auf 42 % zu verringern, sowie die Entfernung der sorptionsverbundenen Feuchtigkeit von der Oberfläche der Teilchen des Pigmentes ohne Errungenschaft der Schwellenbedeutung der zu des Systems zugeführten Energie zu gewährleisten, die zur Thermodestruktion des zweckbestimmten Stoffes bringen kann.

---

### **Régimes technologiques du séchage des azopigments thermolobils dans la sécheuse de laminage à bande**

**Résumé:** Sont définis les principaux facteurs qui influent sur la formation des caractéristiques de qualité des pigments organiques à l'exemple du pigment rouge FGR. Pour la déshydratation du pigment ayant des propriétés thermosensibles, est proposée une méthode du séchage par convection dans une couche assurant les plus «douces» conditions de la commande du processus, la possibilité de créer le boîtier partitionné de l'appareil, donc le profil temporaire plus optimal du processus de séchage. Est étudié le processus de séchage du pigment à l'aide de la sécheuse de laminage à bande, y compris le régime thermique et hydrodynamique dans chaque chambre ainsi que les caractéristiques cinétiques du processus de séchage. A la base des données expérimentales proposées sont obtenues les solutions technologiques permettant d'intensifier le processus et d'améliorer son efficacité énergétique. L'essence des solutions technologiques consiste dans l'utilisation de la transmission de cycle d'impulsions et dans la modification du schéma du coulement d'air dans les chambres de la sécheuse ce qui a permis d'augmenter les performances de la sécheuse par le produit sec à 80% lors de la réalisation des normes de l'humidité du produit final, de réduire la consommation de la vapeur par unité de masse du produit sec à 42 %, et de garantir la suppression de l'humidité de sorbant ordonnée à partir de la surface des particules du pigment sans atteindre le seuil du système d'énergie, ce qui peut conduire à la destruction thermique de la substance ciblée.

---

**Авторы:** *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и химические технологии»; *Дегтярев Андрей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; *Богачев Дмитрий Анатольевич* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии»; *Бельков Артем Игоревич* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».