

УДК 662.99:661.152.3'1'2'3

## СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ



**В. А. ЧУРОВ**,  
зам. главного  
инженера  
по охране  
окружающей  
среды,  
cva@kali.by



**В. А. СИДОРЧИК**,  
начальник цеха  
комплексных  
удобрений Третьего  
рудоуправления

ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь



**С. Н. КУПРЕЙЧИК**,  
главный инженер  
проекта



**А. В. ЩЕРБИЧ**,  
ведущий научный  
сотрудник,  
канд. техн. наук

ОАО «Белгорхимпром», Минск, Беларусь

*Рассмотрен и методически обоснован проект рекуперации тепловой энергии в цехе комплексных удобрений, действующем на базе Третьего рудоуправления. Прослежены экологические и экономические результаты реализации данного проекта.*

**Ключевые слова:** производство удобрений, гранулы, дымовые газы, тепловая энергия, рекуперация, выбросы вредных веществ.

**DOI:** 10.17580/gzh.2018.08.16

### Введение

Вопросам уменьшения выбросов загрязняющих веществ и экономии топлива в ОАО «Беларуськалий» уделяется постоянное внимание. Примером деятельности предприятия по снижению техногенного воздействия на окружающую среду может служить работа над проектом рекуперации тепловой энергии в процессе производства азотно-фосфорно-калийных (НРК) удобрений в цехе комплексных удобрений на базе Третьего рудоуправления (ЦКУ Третьего РУ) ОАО «Беларуськалий». При составлении проекта был учтен мировой опыт комплексной переработки минерального сырья и охраны окружающей природной среды [1–14].

### Технология производства комплексных удобрений

ЦКУ Третьего РУ введен в эксплуатацию в 2013 г. и вышел на проектную мощность в 240 тыс. т НРК-гранул в год. Потребление природного газа при этом составляет около 2,7 млн м<sup>3</sup> в год. Валовый выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух достигает 53 т в год.

Основными этапами технологии производства комплексных НРК-удобрений являются: грануляция шихты исходных компонентов, сушка гранул и их последующее охлаждение для отгрузки на склад (рис. 1).

Шихта, состоящая из влажных гранул и из неокатанных мелких частиц, из барабана-гранулятора поступает в сушильный барабан. В качестве теплоносителя и сушильного агента при сушке в барабане используются топочные газы, полученные при смешении

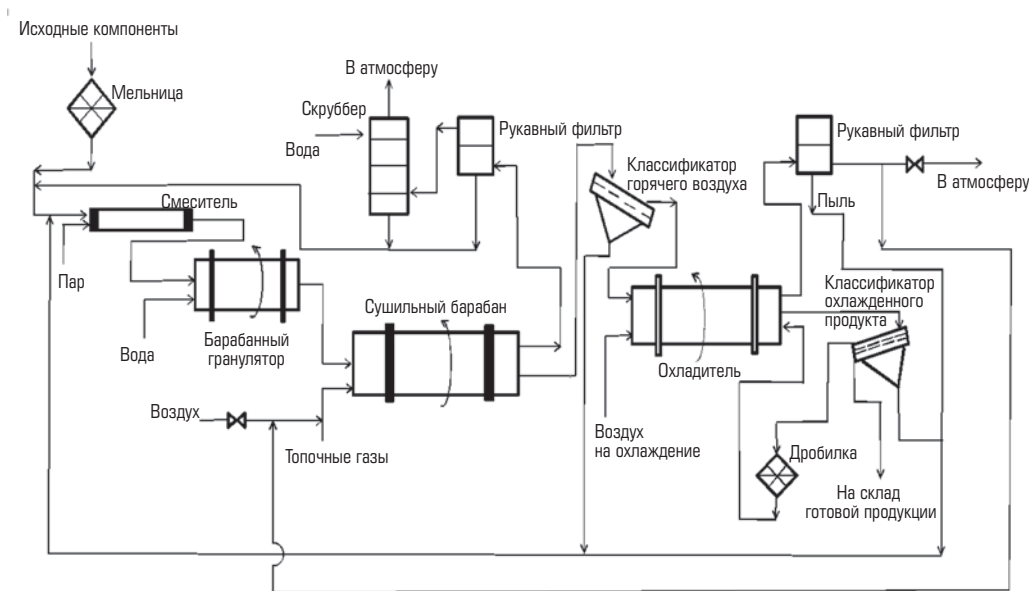
продуктов сгорания природного газа в топке барабана с атмосферным воздухом.

Процесс сушки гранул – это наиболее энергозатратная часть процесса производства НРК-удобрений. Тепловой энергии топочных газов должно быть достаточно для испарения влаги гранул. Расход природного газа зависит также от теплофизических свойств высушиваемых гранул, условий окружающей среды, технических характеристик сушильного барабана.

Дымовые газы, отводимые после сушильного барабана, содержат в своем составе оксид углерода, диоксид азота, углероды предельные алифатического ряда C<sub>1</sub>–C<sub>10</sub> (алканы), аммиак, а также твердые частицы, представленные мелкодисперсной пылью исходных компонентов для производства комплексного удобрения. Для улавливания загрязняющих веществ, выделяемых при процессе гранулирования в барабане-грануляторе и при процессе сушки в сушильном барабане, предусмотрена двухступенчатая газоочистка: сухая – в рукавном фильтре; мокрая – в скруббере. В мокрой ступени очистки используется абсорбционная жидкость, содержащая соляную кислоту для улавливания аммиака. Уловленные загрязняющие вещества возвращаются в технологический процесс – в смеситель. Дымовые газы после процессов гранулирования и сушки, очищенные от загрязняющих веществ до установленных нормативов, выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу.

После сушильного барабана горячие гранулы с температурой на уровне 90 °С подаются на классификацию, откуда надрешетный продукт просеивающей машины (гранулы) поступает на охлаждение в барабан-охладитель. Охлаждение гранулированного продукта производится атмосферным воздухом до температуры порядка 30 °С. Количество охлаждающего воздуха регулируется и зависит от выпускаемой марки и количества продукта, температуры окружающей среды.

Учитывая, что отходящие газы после процесса охлаждения гранул НРК-удобрений в барабане-охладителе содержат в своем



**Рис. 1.**  
Принципиальная технологическая схема производства комплексных удобрений

составе только твердые загрязняющие вещества, для их улавливания предусмотрена одноступенчатая газоочистка в рукавном фильтре. Содержание пыли в очищенном газе составляет около  $10 \text{ мг/м}^3$ .

Очищенный воздух после рукавного фильтра направляется в дымовую трубу. Уловленная пыль совместно с подрешетным продуктом классификации возвращается в технологический процесс – в смеситель.

Охлажденные гранулы поступают на контрольную классификацию, а затем – на склад.

### Обоснование возможности рекуперации тепловой энергии

С целью снижения техногенного воздействия на окружающую среду и уменьшения расхода природного газа на сушку гранул планируется подать подогретый воздух из барабана-охладителя после рукавного фильтра в камеру смешения топки сушильного барабана в качестве замены атмосферного воздуха при смешении с продуктами сгорания природного газа. При этом будет использоваться возвращаемая тепловая энергия подогретого воздуха – рекуперация и достигаться снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет уменьшения образования продуктов сгорания топлива. Кроме того, это позволит исключить выброс отходящих газов в атмосферу от барабана-охладителя и, соответственно, уменьшить валовой выброс твердых веществ.

Для определения технической возможности рекуперации тепловой энергии и оптимизации режимных параметров технологического процесса производства NPK-удобрений была разработана математическая модель, основанная на уравнениях теплового и материального баланса для сушильного барабана и барабана-охладителя. В результате совместного решения системы этих уравнений получены аналитические зависимости для расчета расхода топлива в случае с рекуперацией тепловой энергии воздуха, нагретого в барабане-охладителе и без нее.

Расход природного газа для случая полного высушивания гранул в сушильном барабане с рекуперацией тепловой энергии воздуха, нагретого в барабане-охладителе, определяется по формуле

$$G_{п.г} = \frac{G_{д.г} i_{д.г}^1 + G_{воз} i_{воз}^H}{\rho_{п.г} (q_{п.г} + i_{п.г})}, \quad (1)$$

где  $G_{п.г}$  – расход природного газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $G_{д.г}$  – расход дымовых газов перед сушильным барабаном,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $G_{воз}$  – расход воздуха, подогретого в барабане-охладителе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $i_{д.г}^1$  – энтальпия дымовых газов перед сушильным барабаном,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $i_{воз}^H$  – энтальпия нагретого воздуха,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $\rho_{п.г}$  – плотность природного газа рабочая низшая,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $q_{п.г}$  – теплота сгорания природного газа,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $i_{п.г}$  – энтальпия природного газа перед топкой,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;

Величину  $G_{д.г}$  находим по формуле

$$G_{д.г} = G_M \frac{(i_M^2 - i_M^1) + W(i_n - i_b)}{i_{д.г}^1 - i_{д.г}^2}, \quad (2)$$

где  $G_M$  – расход материала через сушильный барабан,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;  $i_M^1, i_M^2$  – энтальпия материала до и после сушильного барабана соответственно,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $W$  – массовая доля воды в материале перед сушкой;  $i_n, i_b$  – энтальпия пара и воды в дымовых газах и материале перед сушкой соответственно,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $i_{д.г}^2$  – энтальпия дымовых газов после сушки,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

Величина  $G_B$  в формуле (1) определяется следующим образом:

$$G_B = k G_M (1 - W) \frac{i_M^2 - i_M^3}{i_{воз}^H - i_{воз}^a}, \quad (3)$$

где  $k$  – доля подрешетного продукта после классификации;  $i_M^3$  – энтальпия охлажденного материала,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $i_{воз}^a$  – энтальпия атмосферного воздуха,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

На основе формул (1)–(3) составлена целевая функция оптимизации. Поиск оптимального решения выполнен методом градиентов. При оптимизации технологических параметров в качестве

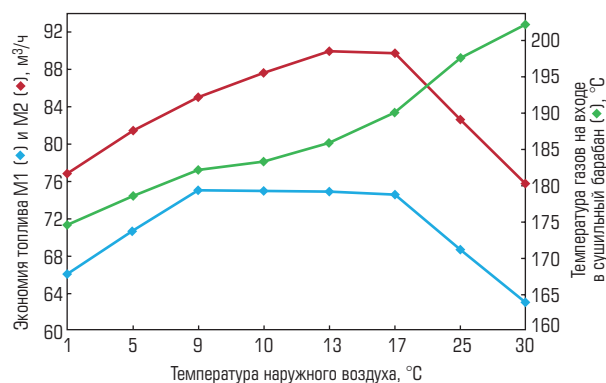
критерия оптимизации использовался максимум экономии топлива, определенной как разность между расходами природного газа без реализации рекуперации тепловой энергии и с рекуперацией. В качестве ограничений использованы параметры технологического регламента производства NPK-удобрений, предельные параметры работы технологического оборудования и условия окружающей среды.

Расчеты подтвердили возможность реализации рекуперации тепловой энергии на установленном оборудовании путем подачи подогретого в барабане-охладителе воздуха в камеру смешения топки сушильного барабана, и использование этого воздуха в качестве сушильного агента и теплоносителя для сушки гранул NPK-удобрений.

В результате установлено, что при работе в проектном режиме за счет подачи в камеру смешения сушильного барабана теплого воздуха после барабана-охладителя в качестве вторичного воздуха может быть получена экономия топлива порядка 430 тыс. м<sup>3</sup> в год, что составляет 16 % технологического потребления природного газа. Снижение потребления природного газа приведет к соответствующему уменьшению количества загрязняющих веществ и парниковых газов, образующихся при сгорании топлива.

Определены оптимальные в плане экономии топлива технологические параметры процесса производства гранул различных марок комплексных NPK-удобрений в зависимости от параметров сырья и окружающей среды при соблюдении технологических ограничений (рис. 2). Из графика видно, что максимальная экономия топлива для марки удобрения М1 (NPK 6-18-34) будет достигнута при температуре наружного воздуха 9 °С, для марки М2 (NPK 15-15-15) – при 12 °С. Марки удобрений, представленные на графике, отличаются друг от друга теплоемкостью, зависящей, в свою очередь, от химического состава.

Разработанная математическая оптимизационная модель



**Рис. 2. Оптимальные технологические параметры при производстве удобрений различных марок с рекуперацией тепловой энергии**

производства комплексных NPK-удобрений с использованием рекуперации тепла, после уточнения в результате наладочных испытаний технологии, может быть использована для разработки новых режимных карт и динамических характеристик для настройки автоматических систем регулирования.

### Заключение

Таким образом, реализация рекуперации тепловой энергии в процессе производства NPK-удобрений в ЦКУ Третьего РУ ОАО «Беларуськалий» позволит не только получить экономический эффект за счет экономии 16 % технологического потребления природного газа, но и, соответственно, уменьшить выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ и парниковых газов, образующихся при сжигании топлива, а также исключить источник выброса от барабана-охладителя.

### Библиографический список

1. Турко М. Р., Шахназаров А. А., Вишняк Б. А. Основные тенденции создания технологических схем переработки силивинитовых руд на современном этапе // Рудник будущего. 2010. № 4. С. 90–98.
2. Крутько Н. П., Шевчук В. В. Совершенствование технологии производства гранулированных калийных удобрений и повышение их качества // Рудник будущего. 2011. № 4(8). С. 12–14.
3. Петрова Е. Е., Сисина Н. Н. Природоохранная деятельность предприятий: инвестирование, учет и анализ: монография. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2013. – 199 с.
4. Шадрунова И. В., Орехова Н. Н. Эколого-экономические аспекты комплексной переработки техногенного гидроминерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 51. С. 161–179.
5. Калугин А. И., Левин Б. В. Приоритетные направления комплексного использования хибинского апатит-нефелинового сырья и их практическая реализация // Горный журнал. 2014. № 10. С. 63–68.
6. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. Спец. выпуск № 15. Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. Вып. 3. С. 5–11.
7. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Возобновляемые источники энергии как георесурс в системе техногенного преобразования недр // Горный журнал. 2015. № 9. С. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.16
8. Шемет С. Ф., Кологривко А. А. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений // Горный журнал. 2015. № 5. С. 100–104. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.21
9. Croson R., Treich N. Behavioral environmental economics: promises and challenges // Environmental and Resource Economics. 2014. Vol. 58. Iss. 3. P. 335–351.
10. Farley J., Costanza R., Flomenhoft G., Kirk D. The Vermont common assets trust: an institution for sustainable, just and efficient resource allocation // Ecological Economics. 2015. Vol. 109. pp. 71–79.
11. Costanza R., Fioramonti L., Kubiszewski I. The UN sustainable development goals and the dynamics of well-being // Frontiers in Ecology and the Environment. 2016. Vol. 14(2). p. 59.
12. Nizevičienė D., Vaičiukynienė D., Vaitkevičius V., Sasnauskas V., Rudelis V. The influence of milling for phosphogypsum and zeolite system // Industrial and Hazardous Waste Management “CRETE 2016”: 5th International Conference, 27–30 September, Greece, 2016.
13. Будденберг Т., Бергинс К., Харп Г. Производство метанола из газообразных отходов металлургического производства // Черные металлы. 2018. № 2. С. 59–66.
14. Альгермиссен Д., Канкаревич М., Рекердсдреес Т., Шлиухакс Х., Цен Т. Rethink, Reduce, Recycle, Reuse – стратегия безотходного производства компании Georgsmarienhütte // Черные металлы. 2018. № 6. С. 46–52. ГЖ



**Reduction in pollutant emission and natural gas consumption with heat energy recuperation in production of compound fertilizers**

**Information about authors**

**V. A. Churov**<sup>1</sup>, Deputy Chief Engineer of Environmental Protection, cva@kali.by

**V. A. Sidorchik**<sup>1</sup>, Head of Compound Fertilizers Workshop, Mine Management 3

**S. N. Kupreichik**<sup>2</sup>, Chief Project Engineer

**A. V. Shcherbich**<sup>2</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

<sup>1</sup> Belaruskali, Soligorsk, Belarus

<sup>2</sup> Belgorkhimprom, Minsk, Belarus

**Abstract**

The article focuses on potential recuperation of thermal energy of air used in production of granulated mineral fertilizers.

In the current technology, hot granules at a temperature of 90 oC are fed to a cooling drum to be cooled down to a temperature of 30 oC using outer air. The air heated by granules is cleaned and discharged through a smoke funnel; thus, its thermal energy is unutilized.

The authors propose to feed the heated air into a drying drum instead of open air mixed with combustion products of natural gas, in this case, thermal energy of the heated air will be utilized (recuperation) and pollutant emissions will be lower owing to reduced generation of combustion products. Furthermore, release of exit gas from the cooling drum into the atmosphere will be eliminated, and, accordingly, total discharge of solids will be decreased.

Aimed to determine technical feasibility of thermal energy recuperation and optimization of operating practice of NPK fertilizers production, a mathematical model was developed based on equations of heat and material balance for the drying and cooling drums. The modeling shows that recuperation of thermal energy during production of NPK fertilizers allows the economical effect by saving 16 % of natural gas utilization, enables reduction in atmospheric emission of pollutants and greenhouse gas after fuel combustion and eliminates emissions from the cooling drum.

**Keywords:** fertilizers production, granules, combustion gas, thermal energy, recuperation, pollutant emission, environmental protection.

**References**

1. Turko M. R., Shakhnazarov A. A., Vishnyak B. A. The main trends of creation of the flowsheets of sylvinitic ores processing at the present stage. *Rudnik budushchego*. 2010. No. 4. pp. 90–98.
2. Krutko N. P., Shevchuk V. V. Improvement of the production technology of granular potassium fertilizers and their quality improving. *Rudnik budushchego*. 2011. No. 4(8). pp. 12–14.
3. Petrova E. E., Sisina N. N. Environmental Protection Activity of Enterprises: Investment, Accounting and Analysis. Saint Petersburg : Publishing House of Saint Petersburg State University of Economics, 2013. 199 p.
4. Shadrunkova I. V., Orekhova N. N. Ecological and economic aspects of complex processing of anthropogenic hydromineral raw materials. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2014. No. 51. pp. 161–179.
5. Kalugin A. I., Levin B. V. Preferred directions and implementation of comprehensive utilization of the Khibiny apatite–nepheline ore. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 10. pp. 63–68.
6. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. Scientific-methodical basis of design of ecologically balanced cycle of complex mastering and saving of Earth soils. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2015. Special issue No. 15. Conditions of Sustainable Development in the Mineral Mining Industry of Russia. Iss. 3. pp. 5–11.
7. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V. Renewable energy sources as a georesource in the system of technology-induced transformation in the Earth's interior. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 9. pp. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.16
8. Shemet S. F., Kologrivko A. A. Mitigation of geoeological impact of underground potash mining. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 5. pp. 100–104. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.21
9. Croson R., Treich N. Behavioral environmental economics: promises and challenges. *Environmental and Resource Economics*. 2014. Vol. 58, Iss. 3. pp. 335–351.
10. Farley J., Costanza R., Flomenhoft G., Kirk D. The Vermont common assets trust: an institution for sustainable, just and efficient resource allocation. *Ecological Economics*. 2015. Vol. 109. pp. 71–79.
11. Costanza R., Fioramonti L., Kubiszewski I. The UN sustainable development goals and the dynamics of well-being. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2016. Vol. 14(2). p. 59.
12. Nizeviciene D., Vaičiukynienė D., Vaitkevičius V., Sasnauskas V., Rudelis V. The influence of milling for phosphogypsum and zeolite system. *Industrial and Hazardous Waste Management CRETE 2016 : 5th International Conference, 27–30 September, Greece, 2016*.
13. Buddenberg T., Bergins Ch., Harp G. Methanol and its fabrication methods in the iron and steel plants. *Chernye Metally*. 2018. No. 2. pp. 59–66.
14. Algermissen D., Cancarevic M., Rekersdrees T., Schliephake H., Zehn T. Waste-free strategy at GMH based on four "R" principles. *Chernye Metally*. 2018. No. 6. pp. 46–52.

