

state of wheels automatically lock braking system (ABS). There is no information about studies of this effect in different algorithms functioning of the ABS in the literature.

Unlike braking on a straight stretch of road in which by force of inertia is a redistribution of the vertical loads between the axles, braking cornering and even accompanied the redistribution of vertical loads between the sides of the vehicle under the influence of lateral forces of inertia .

It is obvious that the maximum vertical load will be on the front outer wheel, the minimum rear inner and outer rear and front inner values of vertical loads will be between Consequently, at equal coupling conditions on all wheels load- coupling conditions will be different.

**Key words:** vehicle,braking, antilock system, algorithm of processing, contact area.

Дата надходження в редакцію: 10.09.2013р.

Рецензент: д.ф.-м.н., професор Кузема О.С.

УДК 628.16

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНАЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ И ГРАНУЛЯЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ХОЛОДА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ КОГЕНЕРАЦИИ И ТРИГЕНЕРАЦИИ**

**А. М. Павлюченко**, д.т.н., профессор, Сумской национальный аграрный университет

*Настоящая работа посвящена созданию энергосберегающей технологии сушки и грануляции минерального удобрения на основе термодинамического анализа с целью снижения потерь эксергии (энергетического потенциала) топлива и продуктов его сгорания. Эта задача решена на применении принципа когенерации для последовательной выработки тепла и дополнительно электроэнергии из топлива и принципа тригенерации для получения из топлива тепла и дополнительно электроэнергии и холода. Применение соответственно принципов когенерации и тригенерации основано на введении в технологический цикл мобильной газотурбинной установки и холодильных машин. Это позволяет получить самый высокий эксергетический (реальный).*

**Ключевые слова:** энергосберегающая технология, коэффициент полезного действия, эксергия, грануляция, минеральные удобрения.

### **Постановка проблемы в общем виде.**

В настоящее время актуальными являются проблемы энергосбережения и рационального использования топливно-энергетических ресурсов в различных отраслях промышленности. Особенно остры эти проблемы для энергоемких технологий таких, как сушка и грануляция минерального удобрения, например аммофоса на ОАО «Сумыхимпром».

В странах ЕС накопились знания и практический опыт в энергосбережении. Энергоэффективные меры содержат мировые достижения в области технических и информационных технологий, которые нашли практическое применение. Для осуществления реального энергосбережения в странах ЕС создана инфраструктура энергосбережения, индустрия и сервис специального энергосберегающего технологического и диагностического оборудования. Энергоэффективность в ЕС заложена в системе образования, а инфраструктура энергосбережения потребовала высокой квалификации ученых, инженеров, экономистов, энергоменеджеров, энергоаудиторов, преподавателей вузов. В странах ЕС действуют межгосударственные программы энергоэффективности и Европейская энергетическая Хартия. В странах ЕС улучшаются показатели энергоэффективности действующих технологий на предприятиях, уменьшается удельное потребление электроэнергии, природного газа, пара, сжатого

газа и других топливно-энергетических ресурсов, снижается себестоимость продукции, улучшаются экологические показатели.

Химическая промышленность является одной из энергоемких отраслей, включая ОАО «Сумыхимпром». Технология сушки и грануляции аммофоса и других минеральных удобрений на ОАО «Сумыхимпром» является энергозатратной и требует модернизации с точки зрения энергосбережения. При этом энергосберегающая технология сушки и грануляции удобрений должна быть наукоемкой. Наукоемкость энергосберегающей технологии основывается на применении методов термодинамики и теории теплообмена.

Настоящая работа посвящена решению задачи создания энергосберегающей высокого уровня технологии сушки и грануляции минеральных удобрений, например аммофоса, на ОАО «Сумыхимпром» на основе термодинамического анализа, направленного на рациональное использование энергетического потенциала топлива (природного газа) в отличие от существующих технологий на этом предприятии, в которых имеются значительные потери эксергии (работоспособности) как топлива, так и рабочего тела (продуктов сгорания природного газа), и различные необратимые потери, связанные с процессами теплообмена и смешивания высокотемпературных продуктов сгорания и холодного вторичного воздуха, подаваемого вентилятором, для

формирования необходимого уровня температуры среды для сушки и грануляции минерального сырья.

#### Анализ последних достижений и публикаций.

В настоящее время на ОАО «Сумыхимпром» реализованы технологии типа [1], например технология сушки и грануляции аммофоса, в которой в камере сгорания (теплогенераторе) сжигается природный газ в количестве  $400 \text{ м}^3/\text{час}$  при расходе первичного воздуха  $4000 \text{ м}^3/\text{час}$ . Далее в высокотемпературные продукты сгорания при температуре  $1600^\circ\text{C} \pm 1800^\circ\text{C}$  добавляется холодный воздух в количестве  $18000 \text{ м}^3/\text{час}$  для получения температуры теплоносителя  $520^\circ\text{C} \pm 550^\circ\text{C}$ . На рис.1 представлена принципиальная схема этого технологического процесса. Схема термодинамически не эффективна, так как высокотем-

пературное рабочее тело (продукты сгорания природного газа) не совершает полезной работы, в ее основе имеются необратимые потери энергии, что приводит к снижению коэффициента тепловой эффективности и к перерасходу природного газа, а технология является энергозатратной. Эксергетический коэффициент полезного действия на примере сушки и грануляции аммофоса (рис.1), учитывающий потери эксергии топлива и рабочего тела, деструкцию эксергии, необратимые потери и характеризующий энергоэффективность технологии, составляет по расчетам не более 38%. Эксергия – это максимально полезная работа, которую можно получить в термодинамической системе при обратимом переходе из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой [2].

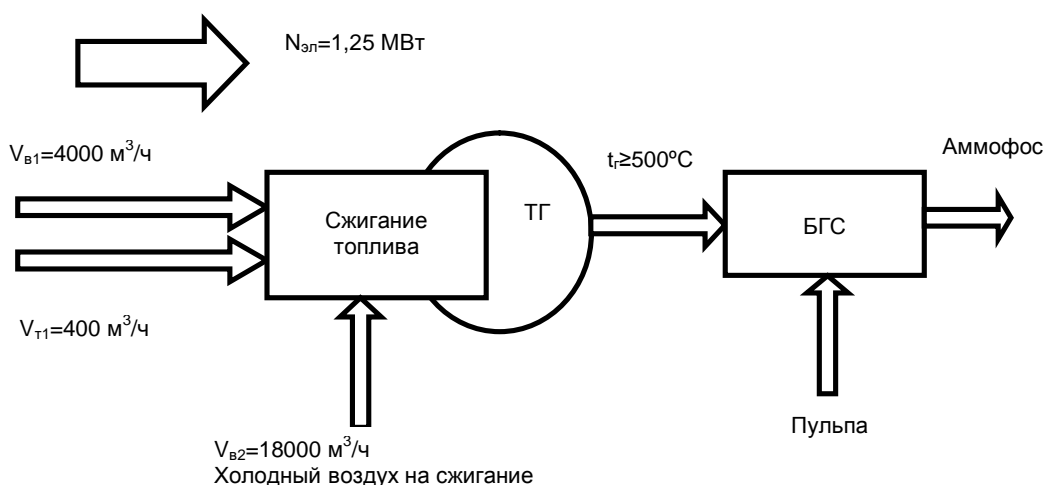


Рис. 1 Блок-схема существующей технологии сушки минеральных удобрений

Эффективность теплотехнических установок определяется на основе термозкономического и эксергоэкономического анализа с учетом потерь эксергии и ее деструкции [2]. Потери эксергии – это потери, которые наблюдаются при взаимодействии теплообменного аппарата с окружающей средой. Деструкция эксергии (рассеяние) обусловлена переносом тепла с высокого температурного уровня на низкий [2]. В эксергетический баланс, например в технологической установке сушки и грануляции аммофоса, входят суммарные потери, связанные с необратимыми потерями при горении топлива, с неравновесностью процесса теплообмена и необратимостью процессов смешения горячих продуктов сгорания и холодного вторичного воздуха [2]. Например, потеря эксергии топлива из-за несовершенства организации процесса горения топлива и неравновесности процесса горения топлива в котельных агрегатах достигает 25 % [3], а из-за неравновесности процесса теплообмена до 30 % [2], обусловленной разностью температуры между продуктами сгорания топлива и минеральным

удобрением.

В настоящее время имеются большие достижения в проведении эксергоэкономического и термозкономического анализа тепло-технических и теплоэнергетических установок с целью оптимизации энергоэффективности путем их совершенствования [2,3,4]. Технология ОАО «Сумыхимпром», например сушки и грануляции аммофоса, осуществлена без учета термодинамических особенностей этого процесса, без совершенства высоко-температурным рабочим телом (продуктами сгорания) полезной работы, без учета всех потерь и деструкции эксергии, без определения эксергетического п.д. установки и требует модернизации на основе термодинамического анализа, оценки термодинамического совершенства технологического процесса.

#### Формулировка целей статьи (постановка задачи).

В теплотехнических и теплоэнергетических установках различных типов существуют необратимые потери энергии [4]. Степень необратимости перехода тепла от горячего к холодному ис-

точнику тем больше, чем больше разности температур горячего источника и рабочего тела, рабочего тела и холодного источника [4]. Наибольшая степень необратимости соответствует переходу тепла от горячего источника к холодному источнику без совершения полезной работы [4]. В технологии сушки и грануляции, например аммофоса, на ОАО «Сумыхимпром» (рис.1) рабочее тело (продукты сгорания газа) не совершает полезной работы, имеются потери эксергии при сжигании природного газа, при смешивании высокотемпературных продуктов сгорания и холодного вторичного воздуха и обусловленные неравновесным процессом теплообмена между рабочим телом и минеральным удобрением.

Таким образом, существующая технология сушки и грануляции минерального сырья с термодинамической точки зрения несовершенна, энергозатратна и требует модернизации.

Для повышения энергоэффективности технологии сушки и грануляции, например аммофоса, и сделать ее энергосберегающей необходима модернизация на основе принципа когенерации. Когенерационная технология предусматривает последовательное использование энергии топлива (природного газа) для выработки электроэнергии и тепла. Существуют технологии, построенные по принципу как когенерации, так и по принципу тригенерации с выработкой электроэнергии, тепла и холода [5].

Для модернизации технологии сушки и грануляции удобрения, например аммофоса на ОАО «Сумыхимпром», актуальной с термодинамической точки зрения является когенерационная технология. Когенерационные установки термодинамически более совершенны, приносят прибыль, позволяющую в приемлемые сроки окупить капитальные затраты, располагаются вблизи потенциальных потребителей электроэнергии и теплоты, что значительно снижает потери электроэнергии в линиях электропередач и потери тепла в теплотрассах; они экоэффективны, так как снижают выбросы токсичных веществ; уменьшают выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу, что обусловлено меньшей затратой топлива; снижают расход топлива и удельные затраты энергии на единицу продукции.

В настоящей работе ставится задача модернизировать существующую технологию сушки и грануляции минерального удобрения, например аммофоса, на ОАО «Сумыхимпром» на основе принципа когенерации как энергосберегающую технологию с производством тепла и с дополнительной выработкой электроэнергии с использованием термодинамического анализа, а также возможность применения принципа тригенерации с выработкой тепла, холода и электроэнергии в технологии сушки и грануляции удобрения.

#### **Изложение основного материала исследования/**

Научно-энергосберегающая технология сушки и грануляции минерального удобрения на основе применения методов технической термодинамики.

Наиболее высокий уровень энергосбережения в сложных технологиях, сопровождающихся тепловыми процессами, например для сушки и грануляции аммофоса на ОАО «Сумыхимпром», соответствует совершенствованию технологии с точки зрения уменьшения расхода топлива, снижения потерь и деструкции эксергии в системе, производства дополнительной электроэнергии. Это направление требует термодинамического анализа для достижения наукоемкости технологии. Процесс сушки и грануляции, например аммофоса, связан с теплообменом высокотемпературных продуктов сгорания природного газа в существующей технологии (рис.1) при непосредственном контакте их с сырьем на всех стадиях сушки и грануляции удобрения без совершения рабочим телом (продуктами сгорания топлива) полезной работы. Это соответствует наибольшей степени необратимости при переходе тепла от горячего источника к холодному, росту энтропии в соответствии с законом возрастания энтропии в необратимых процессах [4], к неполному использованию энергетического потенциала топлива и его продуктов сгорания.

Эксергия топлива – это величина технической работы, которую можно получить в результате обратимого окисления топлива с образованием веществ, не обладающих эксергией и, следовательно, находящихся в химическом, тепловом и механическом равновесии с окружающей средой.

Величина химической эксергии топлива в случае протекания обратимой реакции топлива при температуре T<sub>0</sub> и давлении P<sub>0</sub> окружающей среды определяется уравнением

$$e_T(T_0, P_0) = q_H(T_0, P_0) + T_0 [\bar{m}_T \cdot S_T(T_0, P_0) - \bar{m}_B S_B(T_0, P_0) - S_T(T_0, P_0)] + [\bar{m}_T e_T(T_0, P_0) - \bar{m}_B e_B(T_0, P_0)]$$

Здесь q<sub>H</sub> – теплота сгорания [МДж/кг]; e<sub>T</sub>, e<sub>B</sub> – соответственно эксергия топлива и воздуха [МДж/кг];  $\bar{m}_B$  – относительный расход воздуха  $\left[ \frac{кгВ}{кгТ} \right]$ ;  $\bar{m}_B = \dot{m}_B / \dot{m}_T = (1 + d_s) \alpha \cdot L_0$ ;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха; L<sub>0</sub> – теоретически необходимое количество сухого воздуха для полного сгорания топлива; d<sub>s</sub> – влажность воздуха [кгП/кгСВ]; S<sub>T</sub>, S<sub>T</sub>, S<sub>B</sub> – удельная энтропия соответственно продуктов сгорания, газообразного топлива и воздуха;  $\bar{m}_2 = [(1 + d_s) \alpha \cdot L_0 + 1]$  – относительный расход продуктов сгорания; индексы Т, В, Г относятся соответственно к топливу, воздуху и продуктам сгорания.

Первые два члена в уравнении (1) определяют величину обратимой технической работы окисления топлива - I<sup>0</sup><sub>тех</sub>(T<sub>0</sub>, P<sub>0</sub>). Третий член равен дополнительной эксергии компонентов реак-

ции, имеющих температуру  $T_o$  и давление  $P_o$ .

При стандартных условиях для газообразных топлив с достаточно высокой точностью величина химической эксергии топлива аппроксимируется выражением

$$e_T(T_o, P_o) \cong 1,04 \cdot q_H(T_o, P_o)$$

Это следует из отношения Гиббса и Гельмгольца  $L_{max} = q_H +$

$+ T \cdot \frac{dL_{max}}{dt}$  [3], где  $L_{max}$  - это максимальная полезная работа, которую можно получить, осуществляя любую химическую реакцию;  $q_H$  - низшая теплота сгорания топлива  $\left[\frac{МДж}{кг}\right]$ .

Эксергия компонентов реакции

$$e_k(T_o, P_o) = R_k \cdot T_o \cdot \ln\left(\frac{P_o}{P_k^o}\right), \quad (3)$$

где  $P_k^o$  - парциальное давление компонентов в окружающей среде ( $P_o = 1,01325$  бар,  $T_o = 298,16$  К; водяной пар в воздухе находится в насыщенный состоянии);  $R_k$  - газовая постоянная компонентов реакции;  $k$  - индекс компонентов реакции.

Потери эксергии при адиабатном процессе горения топлива в камере сгорания определяются на основе двух методов: 1) метода вычитания потоков эксергии; 2) метода суммирования энергии (потерь эксергии). Анергия  $a_H$  - это часть энергии, которая не может быть использована для совершения полезной работы [2];

$a_H = U_o + T_o(S - S_o) + P(V - V_o)$ , где индекс «0» означает параметры окружающей среды;  $U, S, V$  - соответственно удельные внутренняя энергия, энтропия и объем; индекс 0 относится к окружающей среде.

Потери эксергии при адиабатном горении топлива в камере сгорания определяются уравнением

$$n_e = e_T(T_T, P_T) + \bar{m}_B e_B(T_B, P_B) - \bar{m}_2 e_2(T_2, P_2) \frac{кДж}{кгТ}$$

Здесь  $e_T, e_B, e_G$  - эксергия соответственно топлива, воздуха и продуктов сгорания;  $\bar{m}_B, \bar{m}_G$  - относительный расход соответственно воздуха и продуктов сгорания; индексы «Т», «В», «Г» относятся соответственно к топливу, воздуху и продуктам сгорания.

Более удобная формула для расчета суммирования потерь эксергии на килограмм топлива

$$n_e = T_o \cdot \Delta S_{кС} \left[ \frac{кДж}{кгТ} \right], \quad \text{где } \Delta S_{кС} = \bar{m}_2 S_2(T_2, P_2) - S_T(T_T, P_T) - \bar{m}_B S_B(T_B, P_B); \quad (6)$$

$S_T, S_B, S_G$  - энтропия соответственно продуктов сгорания, газообразного топлива и воздуха;  $кС$  - индекс камеры сгорания.

Эксергетический к.п.д. камеры сгорания определяется по формуле, которая справедлива для камеры сгорания в составе газотурбинной установки:

$$\eta_e^{кС} = 1 - \frac{n_e}{e_T} \quad (7)$$

где  $n_e$  - суммарная потеря эксергии на кг топлива при адиабатном горении топлива;  $e_T$  - эксергия топлива.

Для проточной стационарной камеры сгорания с компрессором или вентилятором (для подачи воздуха) эксергетический к.п.д. рассчитывается по формуле (8):

$$\eta_e^{пр} = 1 - \frac{n_e}{e_T}, \quad (8)$$

где эксергия потока топлива в камере сгорания определяется уравнением

$$e_T(T_T, P_T) = e_T(T_o, P_o) + [i_T(T_T, P_T) - i_T(T_o, P_o)] - T_o [S_T(T_T, P_T) - S_T(T_o, P_o)] \quad (9)$$

Здесь  $T_o = 298,16$  К и  $P_o = 1,01325$  бар - параметры стандартного состояния, принятые для определения химической эксергии топлива;  $i_T$  - энтальпия топлива; индексы «Т», «О» относятся соответственно к топливу и к окружающей среде;  $i_T$  - энтальпия топлива.

По результатам расчетов установлено, что в существующей технологической схеме сушки и грануляции, например аммофоса на ОАО «Сумыхимпром» (рис.1), основная часть подводимой в систему эксергии теряется в камере сгорания - 62%. В процессе сушки потери эксергии составляют <1%. Эксергетический к.п.д. технологической системы не превосходит 38%. Эти данные свидетельствуют о том, что необходимо повысить степень термодинамического совершенства существующей технологии сушки и грануляции минерального удобрения, например аммофоса.

Научно-техническая модернизация существующей технологии сушки и грануляции минерального удобрения на примере аммофоса на ОАО «Сумыхимпром» проведена на основе термодинамического анализа следующим образом.

Выше было отмечено, что наибольшая степень необратимости процессов, происходящих в термодинамической системе, потери эксергии в системе соответствуют переходу тепла от горячего источника к холодному без совершения полезной работы рабочим телом [4]. Для модернизации существующей технологии сушки и грануляции, например аммофоса, важным с научно-технической точки зрения является применение принципа когенерации, предусматривающего последовательное преобразование энергии топлива в электроэнергию и тепло. Самый высокий уровень энергосбережения в энерготехнологических системах соответствует производству тепла и дополнительной выработке электроэнергии за счет совершения полезной работы высокотемпературным рабочим телом (продуктами сгорания топлива), что согласуется с принципом когенерации.

ОАО «Сумыхимпром» была предложена термодинамически обоснованная модернизация технологии сушки и грануляции на примере ам-

мофоса с включением в технологический процесс газотурбинной установки (ГТУ), в результате чего в ГТУ продукты сгорания природного газа совершают полезную работу в газовой турбине с выработкой электроэнергии в связанном с ней электрогенераторе, а тепло выхлопных газов после газовой турбины используется в процессе сушки и грануляции аммофоса. После газовой турбины ГТУ температура газов составляет не выше  $420 \div 450 \text{ }^\circ\text{C}$  и необходимо дополнительное сжигание природного газа в количестве 30% от общего его объемного расхода в существующей технологии в дополнительных горелках теплогенератора. Дополнительный природный газ сжигается в потоке выхлопных газов после газовой турбины, коэффициент избытка воздуха в которых более  $\alpha \geq 4,0$ , необходимый для достижения перед турбиной температуры в пределах  $850^\circ\text{C}$  по прочности ее лопаток.

Схема модифицированной технологии сушки и грануляции минерального удобрения на основе принципа когенерации с дополнительной выработкой электрической энергии представлена на рис.2. Основой когенерационной технологии является газотурбинная установка, например ЭГ-1000 производства ОАО «Мотор Сич», выполненная по авиационным технологиям, являющаяся мобильной, автоматизированной, допускающая более 100 пусков и остановок в год, имеющая установленную мощность 1,2 МВт из ряда выпускаемых предприятием газотурбинных электростанций. На модернизированную технологию сушки и грануляции минерального удобрения ав-

тором и др. получен патент Украины [6].

Применение газотурбинной установки в технологическом процессе позволяет за счет рационального использования энергетического потенциала топлива обеспечить объемный расход сушильных газов  $V_{Cr} = 22000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и их температуру  $t_{Cr} = 520 \div 550^\circ\text{C}$  на входе в барабанную сушилку-генератор (БГС) и выработку дополнительной электроэнергии в количестве 1 МВт. В предлагаемой модернизированной когенерационной технологии сушки и грануляции минерального удобрения, например аммофоса, (рис.2) формируется два энергетических потока топлива, из которых один при объемном расходе  $V_{T2} = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$  направляется в камеру сгорания ГТУ типа ЭГ-1000, в которой вырабатывается электроэнергия, а другой с объемным расходом  $V_{T1} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$  природного газа направляется в дополнительные горелки теплогенератора при объемном расходе первичного воздуха  $V_{B1} = 4000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и упомянутом расходе природного газа  $V_{T1} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Объемный расход воздуха, поступающий в камеру сгорания после компрессора, имеющего общий вал с турбиной ГТУ (ЭГ-1000), составляет  $V_{B2} = 18000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Продукты сгорания дополнительного природного газа ( $V_{T1} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) при температуре  $1600^\circ\text{C} - 1700^\circ\text{C}$  в горелках теплогенератора смешиваются с выхлопными газами ГТУ для получения температуры сушильных газов, поступающих на сушку и грануляцию минерального удобрения в БГС (барабанную сушилку-гранулятор), в пределах  $520^\circ\text{C} - 550^\circ\text{C}$  (рис.2).

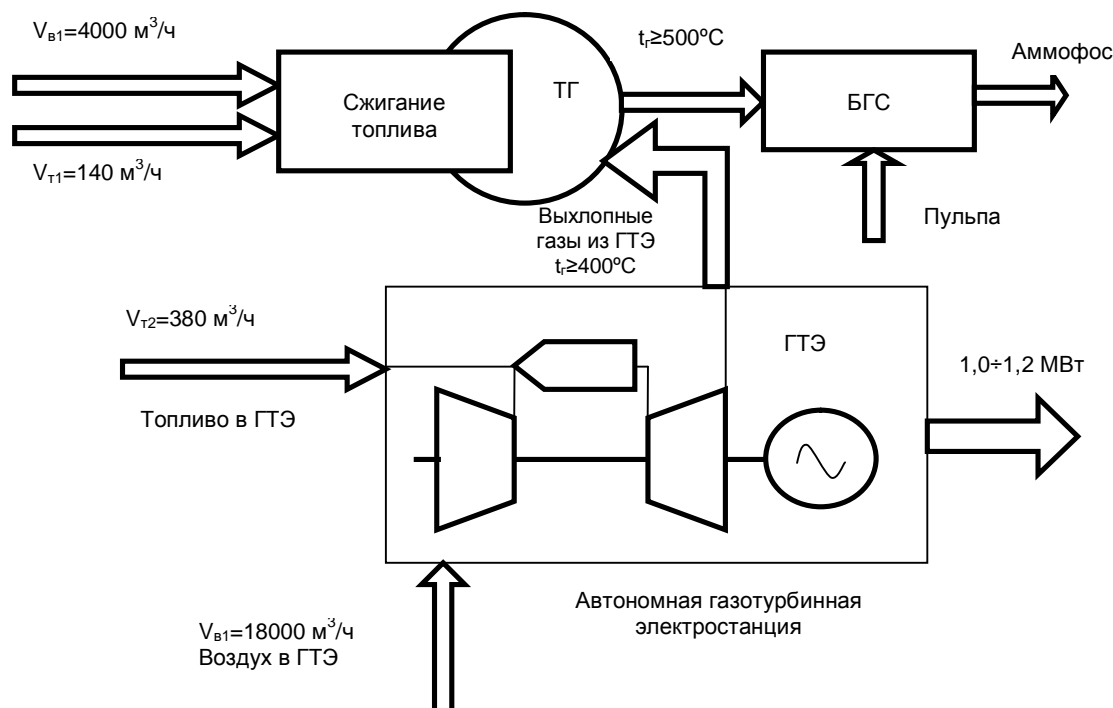


Рис. 2 Блок-схема технологии сушки в энергосберегающей энерготехнологической установке: ГТЭ - газотурбинная электростанция; ТГ – теплогенератор; БГС - барабанная сушилка – гранулятор

Важно подчеркнуть, что состав сушильных газов для каждого компонента ( $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , воздуха) в существующей технологии сушки и грануляции минерального удобрения (рис.1) и в модернизированной технологии (рис.2) отличается не более, чем на 4% по численным расчетам.

Для получения данных о термодинамической эффективности предлагаемой модернизированной технологии сушки и грануляции минерального удобрения, например аммофоса, были проведены расчеты потери эксергии в элементах газотурбинной установки и на участке сушки поступающей пульпы удобрения и затем процесса грануляции. Эксергетический к.п.д. камеры сгорания в составе ГТУ определялся по соотношению (7)  $\eta_e^{kc} = 1 - \frac{n_e}{e_T}$ , где  $n_e$  есть потери эксергии при адиабатном горении топлива и рассчитываются по формуле (4), а эксергия потока топлива  $e_T$  по формуле (9). Для расчета суммирования потерь эксергии  $n_e$  в камере сгорания ГТУ могут быть использованы соотношения (5) и (6). Были определены потери эксергии в компрессорном блоке, в турбинном блоке, в процессе сушки, при дожигании топлива. Степень термодинамического совершенства модернизированной технологии сушки и грануляции аммофоса для ОАО «Сумыхимпром» рассчитывалась по формуле

$$\eta_e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_{ei}}{e_T \cdot m_T}$$

Здесь  $\sum_{i=1}^n P_{ei}$  - суммарные потери эксергии во всех  $i$ -тых элементах от  $i=1$  до  $i=n$  технологи-

ческого процесса по модернизированной схеме, включая все элементы ГТУ (рис.2);  $e_T$  - эксергия топлива (природного газа);  $m_T$  - расход топлива.

В обеих технологиях (в существующей и предлагаемой модернизированной) сушки и грануляции минерального удобрения на ОАО «Сумыхимпром» объемный расход сушильных газов составляет  $V_{CF} = 22000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура их  $520 \div 550^\circ\text{C}$ .

Поэлементное исследование двух технологий сушки и грануляции аммофоса показало, что в существующей схеме основная часть подводимой эксергии теряется в камере сгорания (теплогенераторе) – 62 %, при сушке потери эксергии составляют <1%. Суммарные потери эксергии составляют 62,4%.

Для предлагаемой модифицированной когенерационной схемы с использованием ГТУ типа ЭГ-1000 производства ОАО «Мотор Сич» с электрической мощностью 1 МВт потери эксергии в камере ГТУ, выполненной по авиационным технологиям, составляет – 33%, в газовой турбине – 5,5%, в компрессоре – 3,2%, при подаче на дожигание природного газа и при его дожигании – 7%, в сушке <1%. Суммарные потери эксергии составляют ~ 42,41%. На рис.3 приведены результаты расчета эксергетического к.п.д. для существующей и модернизированной технологии. Эксергетический к.п.д. модернизированной когенерационной схемы составляет 53%, а существующей технологии – 38%.

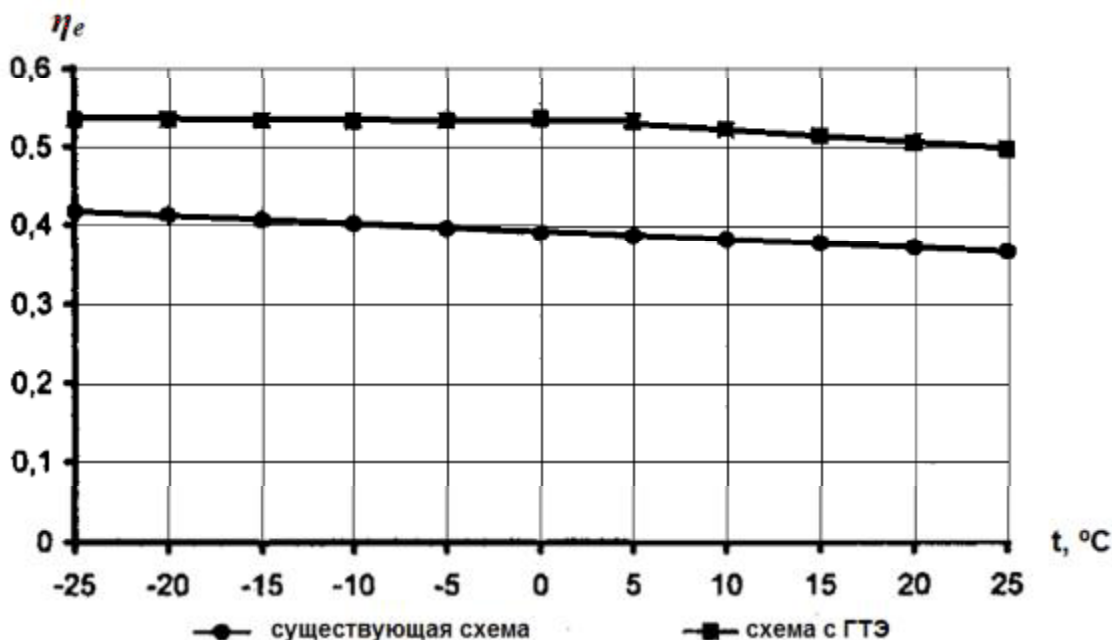


Рисунок 3 – Зависимость эксергетического КПД от температуры наружного воздуха.

В настоящее время в теплотехнике разрабатываются и уже действуют в ряде случаев схемы энергосбережения с использованием

скрытой теплоты парообразования при конденсации водяных паров, содержащихся в уходящих газах тепло- и парогенераторов, в специальных

теплообменниках – конденсаторах [7, 8]. Например, для современных барабанных котлов с температурой уходящих газов 140°C установка конденсационного экономайзера приводит к уменьшению температуры уходящих газов до 65°C и повышению общей тепловой эффективности на 5% [7]. При этом температура питательной воды перед входом в котел должна поддерживаться ниже температуры насыщения.

Схемы с использованием тепла при конденсации водяных паров, содержащихся в уходящих из теплотехнических агрегатов газах, разрабатываются, например во Франции [8].

Поскольку в сушильных газах действующей и предлагаемой когенерационной технологии сушки и грануляции, например аммофоса, содержатся пары воды, то использование скрытой теплоты парообразования при конденсации их в специальном теплообменнике-конденсаторе с учетом снижения температуры уходящих газов, например до 65°C, позволит повысить общую эффективность технологии на несколько процентов, при этом эксергетический к.п.д. составит более 55%, что достаточно быстро окупит капитальные затраты на конденсатор-теплообменник.

Целесообразно провести еще более глубокую модернизацию действующих линий сушки и грануляции минеральных удобрений на ОАО «Сумыхимпром» на основе принципа тригенерации с последовательной реализацией потенциала топлива (природного газа) в газотурбинной установке (ГТУ), например производства ОАО «Мотор Сич», для выработки электроэнергии, использования продуктов сгорания после газовой турбины ГТУ с дожиганием в них около 30% природного газа для приготовления сушильных газов с температурой 520÷550°C и затем для производства холода, реализуя тепло уходящих газов на выходе после сушки и грануляции удобрения. Производство холода можно осуществить, например в бромистолитиевой холодильной машине для получения температуры выше нуля градусов Цельсия (+ 7°C) при температуре уходящих газов более 90°C или абсорбционного типа холодильной машине для температуры ниже нуля градусов Цельсия при температуре уходящих газов более 100°C.

Таким образом, применение принципа тригенерации для повышения степени термодинамического совершенства технологии сушки и грануляции минерального удобрения позволит получить величину эксергетического к.п.д. большую, чем при использовании принципа когенерации.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный термодинамический анализ существующей технологии сушки и грануляции минерального удобрения на примере аммофоса на ОАО «Сумыхимпром» и предлагаемой модернизированной когенерационной технологии на

основе газотурбинной установкой (ГТУ) с выработкой тепла сушильных газов и дополнительной электроэнергии в количестве 1 МВт на одну линию и 6 МВт на шести линиях показал, что предлагаемая схема с ГТУ термодинамически более совершенна. Это наглядно видно из сравнения зависимости эксергетического к.п.д.  $\eta_e$  двух схем в зависимости от температуры наружного воздуха (рис.3). Эксергетический к.п.д.  $\eta_e$  модернизированной по когенерационному принципу установки сушки и грануляции аммофоса на 40% выше, чем на традиционной действующей установке ОАО «Сумыхимпром», и составляет по расчетам  $\eta_e = 53\%$ .

2. При использовании тепла за счет конденсации в конденсаторе-теплообменнике водяного пара, содержащегося в уходящих газах (продуктах сгорания природного газа), тепловая эффективность технологии сушки и грануляции, как следует из [7÷9], может увеличиться на 5% и эксергетический к.п.д.  $\eta_e$  при когенерационной схеме составит более 55%.

3. Модернизация существующей технологии по когенерационной схеме с ГТУ требует значительных капитальных затрат на приобретение автоматизированной мобильной установки, например производства ОАО «Мотор Сич».

Срок окупаемости модернизированной когенерационной установки составляет 6÷7 лет, что согласуется с международными нормами и может быть значительно снижен при партнерстве с ОАО «Мотор Сич» по внедрению новой когенерационной технологии сушки и грануляции минерального удобрения, при реализации модернизированной технологии на внутреннем и внешнем рынках.

Прибыль и срок окупаемости установки зависят от цен на природный газ и на вырабатываемую дополнительную электроэнергию 1 МВт мощности на одну линию сушки и грануляции аммофоса. Всего таких линий шесть.

4. Модернизация существующей энергоснабжающей технологии сушки и грануляции минерального удобрения на примере аммофоса на ОАО «Сумыхимпром» по когенерационной схеме с использованием газотурбинной установки для производства тепла и дополнительной выработки электроэнергии позволит эффективно использовать первичные энергоресурсы, снизить себестоимость продукции, получить прибыль за счет производства электроэнергии и снижения удельного расхода газа, внести вклад в энергетическую независимость предприятия.

5. Наряду с модернизацией технологии сушки и грануляции аммофоса и других минеральных удобрений на ОАО «Сумыхимпром» по принципу когенерации целесообразно реализовать принцип тригенерации для производства тепла, холода и производства электроэнергии, повышающей степень термодинамического со-

вершенства системи в сравненні з когенерацією і досягаючої відповідно більш високого ексергетического к.п.д.

В науко-технічеському обоснованні предста-

вленої когенераційної технології сушки і грануляції мінерального добрива на приємері аммофоса приймає участь к.т.н. В.Н. Марченко.

#### **Список использованной литературы:**

1. Попов Н.П. Сушка сложносмешанных удобрений / Н.П. Попов, М.В. Лыков, В.М. Лембриков и др. // Реф. сборник «Промышленность минеральных удобрений и серной кислоты». Вып. II, М.: НИТЭХИМ, 1973. – С. 7-9.
2. Драганов Б.Х. Теплотехника / Борис Харлампиевич Драганов, А.А. Долинский, А.В. Мищенко, Е.М. Письменный. – Киев: «ИНКОС», 2005. – 504 с.
3. Баскаков А.П. Теплотехника / Альберт Павлович Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
4. Кириллин В.А. Техническая термодинамика / Владимир Алексеевич Кириллин, В.А. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Наука, 1979. – 512 с.
5. Клименко В.Н. Энергосбережение и энергоэффективность на основе методов когенерации и тригенерации в теплотехнических и энерготехнологических объектах / В.Н. Клименко // Доклад на XIII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению / Секция «Энергосбережение, экология и экономика». – г. Сумы, Украина. – 2004 г.
6. Способ подготовки сушильных газов для производства минеральных удобрений / А.М. Павлюченко, Е.В. Лапин, В.Н. Марченко, М.Д. Степаненко, Э.А. Карпович и др. // Патент Украины № 70072 А.7Ф 26В9/06, F 26В17/00. Опубл. 15.09.2004. Бюл. №9.
7. Труды March Consulting Group. – 1999. P. 112.
8. Тишаев С.И. Использование водогрейных конденсационных установок с глубокой утилизацией тепла производства YGNIS-GUILLOT (Франция) для коммунального и промышленного производства / С.И. Тишаев // Труды Международной конференции «Энергосберегающие технологии и оборудование для промышленной и коммунальной энергетики Украины». – Киев, Украина. – 2007 г. – С. 25-26.

#### **Павлюченко А. М. ТЕРМОДИНАМІЧНО ЕФЕКТИВНА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ СУШКИ І ГРАНУЛЯЦІЇ МІНЕРАЛЬНОГО ДОБРИВА З ДОДАТКОВИМ ВИРОБЛЕННЯМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ХОЛОДУ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ КОГЕНЕРАЦІЇ ТА ТРИГЕНЕРАЦІЇ**

Представлена робота присвячена створенню енергозберігаючої технології сушіння і грануляції мінерального добрива на основі термодинамічного аналізу з ціллю зниження втрати енергії (енергетичного потенціалу) палива і продуктів його згорання. Ця задача вирішена на застосуванні принципу когенерації для послідовного вироблення тепла і додатково електроенергії із палива і принципу тригенерації для одержання із палива тепла і додатково електроенергії і холоду. Застосування відповідно принципів когенерації та тригенерації засноване на введенні в технологічний цикл мобільної газотурбінної установки і холодильних машин. Це дозволяє одержати найвищий енергетичний (реальний) коефіцієнт корисної дії.

**Ключові слова:** енергозберігаюча технологія, коефіцієнт корисної дії, енергія, грануляція, мінеральні добрива.

#### **Pavlyuchenko A. M. THERMODYNAMIC ENERGY-SAVING TECHNOLOGY OF DRYING AND GRANULATION OF A MINERAL FERTILIZERS WITH THE ADDITIONAL GENERATION OF ELECTRIC POWER AND COLD ON THE BASIS OF PRINCIPLES OF COGENERATION AND TRIGENERATION**

This work deals with the creation of energy-efficient technology of drying and granulation of a mineral fertilizer on the basis of thermodynamics analysis with the purpose of minimizing losses of exergy (efficiency) of fuel and its combustion products. This problem is solved on the basis of the principle of cogeneration for the subsequent generation of heat and additional electric power from fuel and on the basis of the principle of trigeneration to generate heat and additional electric power and cold from fuel. The application of the principles of cogeneration and trigeneration is based on the introduction of the gas-turbine installation and refrigeration machine into the technological cycle. The new technology allows obtaining the highest exergic (real) efficiency factor.

**Keywords:** energy saving technology, efficiency, exergy, granulation, fertilizers.

Стаття надійшла в редакцію: 20.09.2013р.

Рецензент: д.т.н., професор Лавров Є.А.