

20. Басманов, А. Е. Взаимодействие водяной струи со стенкой резервуара при его охлаждении в условиях пожара [Текст] / А. Е. Басманов, А. А. Михайлюк // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – Вып. 25. – С. 14–19.
21. Мойка грузовых танков и топливных цистерн танкеров. Типовая технология, технические требования: РТМ31.2006-78 [Текст] / Официальное издание, 1980. – 78 с.
22. Системы подогрева жидких грузов морских нефтеналивных судов. Правила и нормы проектирования: РД5.5524-82 [Текст] / Официальное издание, 1984. – 105 с.

**Отримані залежності, які дозволяють встановити кількість теплової енергії, що виділяється та споживається в одиничному об'ємі спікаємої шихти по висоті шару від середнього діаметру часток матеріалу.**

**Наведені рівняння для обчислення кількості теплової енергії, що виділяється та споживається одиничним об'ємом при горінні часток палива й екзо- та ендотермічних реакцій, що протікають в ньому**

**Ключові слова: середній діаметр шихти, тепла енергія, барабанний живильник, агломерація, сегрегація, полідисперсна шихта**

**Получены зависимости, позволяющие определить количество выделяемой и поглощаемой тепловой энергии в единичном объеме спекаемой шихты по высоте слоя от среднего диаметра частиц материала.**

**Представлены уравнения, позволяющие вычислить количество тепловой энергии, выделяемой и поглощаемой в единичном объеме при горении частиц топлива и протекающих в нем экзо- и эндотермических реакций**

**Ключевые слова: средний диаметр шихты, тепловая энергия, барабанный питатель, агломерация, сегрегация, полидисперсная шихта**

УДК 669.162.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29214

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В СЛОЕ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ

А. С. Мных

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра электротехники и энергетического менеджмента  
Запорожская государственная инженерная академия  
пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69007  
E-mail: mnikh.a@yandex.ua

### 1. Введение

Основным способом окускования мелких железных руд и железорудных концентратов является агломерация методом просасывания. Благодаря сравнительной простоте технологии, высокой производительности ленточных агломерационных машин, сравнительно высокому качеству получаемого продукта этот способ нашел самое широкое распространение во всей мировой практике производства черных металлов из железных руд.

Агломерация является термическим процессом подготовки железорудного сырья к металлургическому переделу, в котором сочетаются потребление дорогостоящего твердого и газообразного топлива. Спекание материала сопровождается процессами нагрева и плавления шихты, горения топлива, разложения гидратов и карбонатов, окисления и восстановления окислов, которые протекают в небольшой по высоте части слоя – зоне горения, которая непрерывно перемещается в направлении колосниковой решетки.

Нагрев шихты в каждом элементарном слое происходит как за счет теплопередачи от вышележащих слоев, так и за счет тепла, выделяющегося при горении частиц твердого топлива и экзотермических реакций

в рассматриваемом единичном объеме слоя. Тепло, аккумулированное в этом объеме, расходуется на нагрев и оплавление частичек шихты, а также на протекание эндотермических реакций (разложение карбонатов и гидратов, восстановление окислов и др.).

Изучение составляющих теплового баланса в единичном объеме, позволит в зависимости от известного содержания топлива и химкомпонентов в рассматриваемом объеме, определить количество выделяемой и поглощаемой энергии по высоте слоя.

В настоящее время, учитывая постоянное подорожание энергетических ресурсов, проблема оптимизации агломерационного процесса, с целью сокращения объемов потребления твердого топлива и повышения производительности агломашин, становится крайне актуальной.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопросу изучения теплового режима агломерации было посвящено ряд работ. При математическом описании теплофизической модели процесса в основу принимались уравнения теплового баланса (сохранения энергии) и различных видов теплопередачи [1, 2].

В указанных работах, а также в [3] рассматриваемый слой агломерата разбивался послойно на отдельные горизонты, для каждого из которых составлялись системы уравнений. Учитывая, что отечественное развитие агломерационного процесса движется в направлении увеличения высоты спекаемого слоя, применение указанного метода влечет за собой составление десятков систем уравнений, что затрудняет его практическое применение. Также недостатком представленных математических моделей можно считать отсутствие в описании процесса сегрегации топлива и компонентов шихты по высоте и ширине паллеты, что встречается и в более поздних работах [4–6], последнее является основным фактором, влияющим на тепловой режим процесса спекания.

В работах [7, 8] предложены методы моделирования на основе формально-математического описания физико-химических явлений и реализации вычислительного эксперимента. В работе [9] изложены основные этапы разработки комплексной математической модели, отвечающей требованиям максимальной адекватности реальным теплофизическим и физико-химическим процессам, протекающим в слое при спекании железорудных материалов. Однако, указанные математические модели рассматривают обжиговый агрегат в целом и не рассматривают детально тепловой режим процесса спекания. Для анализа объемов выделения и поглощения теплоты в элементарном объеме слоя материала целесообразно воспользоваться описанием процесса на базе балансового метода с учетом сегрегационных процессов в слое материала.

### 3. Цель и задачи исследования

В работе [10] проведено исследование химсостава агломерационной шихты комбината МК «Запорожсталь» и установлена зависимость содержания топлива и химкомпонентов в грануле от среднего диаметра частицы шихты  $d_{ср}$ .

Целью исследования является получение зависимостей количества внутренней выделяемой и поглощаемой энергии в единичном, расчетном объеме слоя шихты, в зависимости от  $d_{ср}$ .

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- рассмотреть известные подходы для определения объемов тепловыделения в слое;
- определить расчетную область и ее физико-химические параметры для определения количества тепловыделения.

### 4. Известные методы определения количества теплоты выделяемой либо поглощаемой в материале

Наиболее распространенным методом для определения количества теплоты, выделяемой либо поглощаемой в рассматриваемом горизонте слоя, является метод зональных тепловых балансов, предложенный Вендеборном Г. для описания тепловых процессов, про-

текающих в агломерируемом слое. Дальнейшее развитие указанный метод получил в работах Шурхала В. А., Сигова А. А., Братчикова С. Г., Вегмана Е. Ф. [1, 2].

В работе предложено использование указанного метода для определения тепловыделения в элементарном объеме материала, представляющего собой единичный расчетный элемент модели [11, 12], базирующейся на методе конечных элементов.

### 5. Исследование тепловых процессов протекающих в рассматриваемом элементарном объеме шихты

Агломерация протекает с непрерывным выделением и поглощением больших объемов тепловой энергии. Рассмотрим процессы, составляющие приходную и расходную части тепловой энергии, выделяемой в единичном объеме  $P$  некоторого элементарного слоя, представленного на рис. 1.

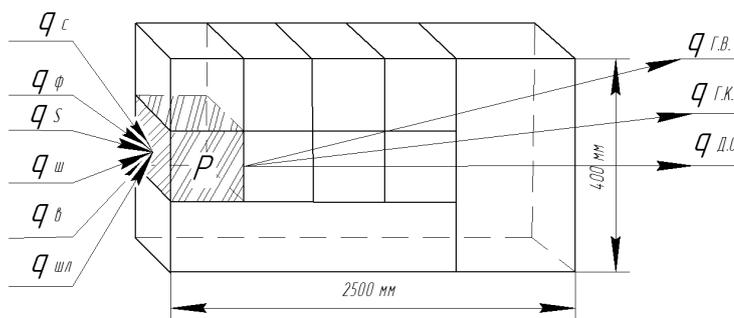


Рис. 1. Единичный расчетный объем агломерационного слоя

Основную часть тепла, поступающего в рассматриваемый объем, вносит теплота горения коксовой мелочи. По данным [1, 2] примерно 80 % углерода топлива шихты сгорает до  $CO_2$  и до 20 % до  $CO$ . Таким образом, количество тепла, выделяющегося в результате горения топлива, определим из выражения:

$$q_c = V\rho_{ш}(a_{co}c_{ш}q_{co} + a_{co2}c_{ш}q_{co2})(1 - \epsilon), \quad (1)$$

где  $V$  – объем расчетного элемента,  $m^3$ ;  $\rho_{ш}$  – плотность шихты,  $kg/m^3$ ;  $a_{co}, a_{co2}$  – доля углерода сгорающего до  $CO$  и  $CO_2$ , %;  $c_{ш}$  – концентрация углерода в шихте, %;  $q_{co}, q_{co2}$  – теплота сгорания углерода до  $CO$  и  $CO_2$  соответственно 9210 кДж/кг, 32815 кДж/кг;  $\epsilon$  – порозность слоя, %.

При агломерации железорудных материалов протекают экзотермические реакции образования силикатов (фаялит, оливин и др.), что составляет до 2 % от общего прихода тепла и по данным Е. Ф. Вегмана и Ж. Мишара [1], при спекании офлюсованных шихт, содержащих флюсообразующие ( $CaO, SiO_2, Al_2O_3$ ), приход тепла от химических реакций составляет в среднем:

$$q_{\phi} = 170 \text{ кДж / кг;}$$

Приход тепла от окисления серы составит [1]:

$$q_s = 133,48 \text{ кДж / кг;}$$

Тепло, вносимое шихтой, можно определить следующим образом:

$$q_{ш} = V\rho_{ш}(a_{р}c_{р}t_{р} + a_{ф}c_{ф}t_{ф})(1 - \epsilon)\vartheta, \tag{2}$$

где  $a_{р}, a_{ф}$  – доля руды и флюса в шихте, %;  $c_{р}, c_{ф}$  – теплоемкость руды и флюса, кДж/(кг·°C);  $t_{р}, t_{ф}$  – температура руды и флюса, °C;  $\vartheta$  – коэффициент аккумуляции тепловой энергии (0,01÷0,5).

Количество тепла, вносимого воздухом, определим из выражения:

$$q_{в} = S_{п}\omega_{в}\tau\epsilon_{с}t_{в}\rho_{в}, \tag{3}$$

где  $S_{п}$  – площадь единичной поверхности элемента, м<sup>2</sup>;  $\omega_{в}$  – скорость воздуха, м/с;  $\tau$  – время нагрева, с;  $c_{в}$  – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C);  $t_{в}$  – температура воздуха, °C;  $\rho_{в}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Учитывая, что газопроницаемость слоя различна по высоте паллеты, на рис. 2 приведена зависимость скорости перемещения воздуха по высоте слоя [13–15].

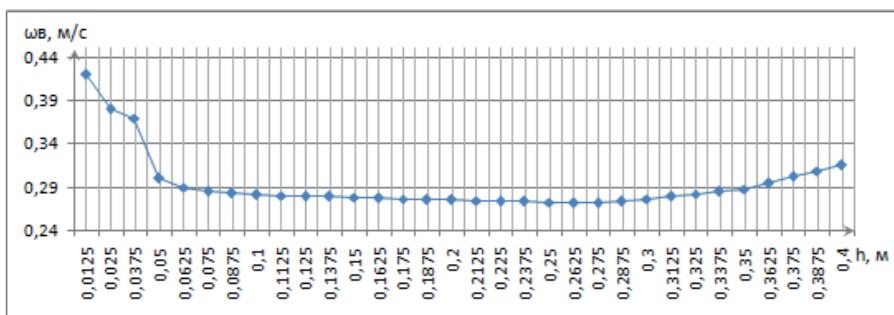


Рис. 2. Изменение скорости воздуха по высоте слоя

При образовании известкового оливина, двухкальциевого силиката и ферритов кальция выделяется тепло. По данным Е. Ф. Вегмана и Ж. Мишара [1], теплоту шлакообразования можно принять равной:

$$q_{ш.л} = 3260 \text{ кДж / 100 кг};$$

К расходным статьям, связанным с поглощением тепла из элементарного объема шихты, можно отнести теплоту на испарение гигроскопической влаги, которую рассчитаем по уравнению:

$$q_{г.в.} = Wc_w(t_{исп} - t_{ш}) + WQ_{исп}, \tag{4}$$

где  $W$  – количество влаги в шихте, кг;  $c_w$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C);  $t_{исп}$  – температура испарения воды, °C;  $t_{ш}$  – температура шихты, °C;  $Q_{исп}$  – теплота испарения воды (2284 кДж/кг).

Для расчета теплоты на диссоциацию гидратов и карбонатов используем уравнение:

$$q_{г.к.} = \sum a_{карб_i} \frac{-\Delta H_{i}}{\mu_{карб_i}} + \sum a_{гидр_i} \frac{-\Delta H_{i}}{\mu_{гидр_i}} = \sum a_{карб_i} Q_{карб_i} + \sum a_{гидр_i} Q_{гидр_i}, \tag{5}$$

где  $a_{карб_i}, a_{гидр_i}$  – содержание соответствующего гидрата и карбоната, кг;  $\Delta H_i$  – теплота образования

соответствующего гидрата и карбоната кДж/(кг·моль);  $\mu_{карб_i}, \mu_{гидр_i}$  – молекулярная масса карбоната, гидрата, кг·моль;  $Q_{карб_i}, Q_{гидр_i}$  – теплота образования карбоната гидрата, кДж/кг.

Таблица 1

Тепловые эффекты диссоциации некоторых карбонатов, гидратов [13]

Карбонат	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	MnCO <sub>3</sub>	FeCO <sub>3</sub>	
$\Delta H_i$ , МДж/(кг·моль)	177,8	117,5	116,6	88,0	
$Q_{карб_i}$ , кДж/кг	1778	1395	1015	758	
Гидрат	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Al <sup>3+</sup>	OH <sup>-</sup>
$\Delta H_i$ , кДж/(кг·моль)	1569	1887	247	4548	339

Уравнение для расчета расхода теплоты на диссоциацию Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> рассчитаем следующим образом:

$$q_{д.о.} = a_{ж}(\Delta H_2 - \Delta H_1), \tag{6}$$

где  $a_{ж}$  – общее содержание железа в спекаемом объеме шихты, кг;  $\Delta H_1, \Delta H_2$  – изменение энтальпий при уменьшении степеней окисленности железа соответственно до Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeO.

Значения  $\Delta H_1, \Delta H_2$  определены из номограмм [2] степени окисленности железа и соответствующих изменений энтальпий.

Результаты расчетов количества тепла, выделяемого и поглощаемого в единичном объеме шихты  $P$ , а также количество тепла, вносимое топливом и химкомпонентами, в зависимости от расположения расчетного элемента по высоте слоя представлены на рис. 3–5.

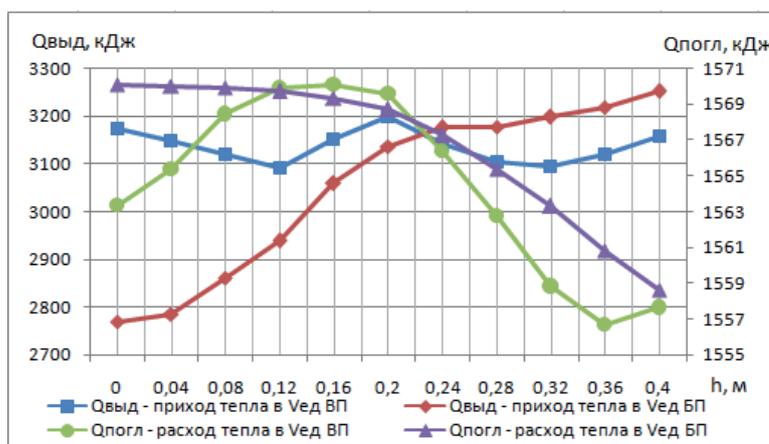


Рис. 3. Суммарное количество тепла, выделяемого и поглощаемого в единичном объеме при использовании различных типов питателей

Зависимости получены для условий МК «Запорожсталь», агломашин № 2, 4, загрузка которых осуществляется вибрационным (ВП) и барабанным (БП) питателями соответственно.

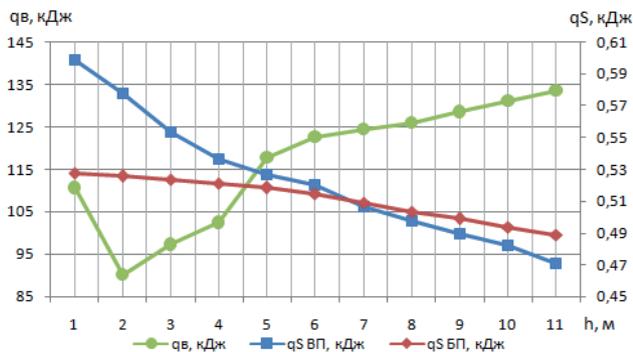


Рис. 4. Количество тепла вносимого воздухом и горением серы в единичном объеме при использовании различных типов питателей

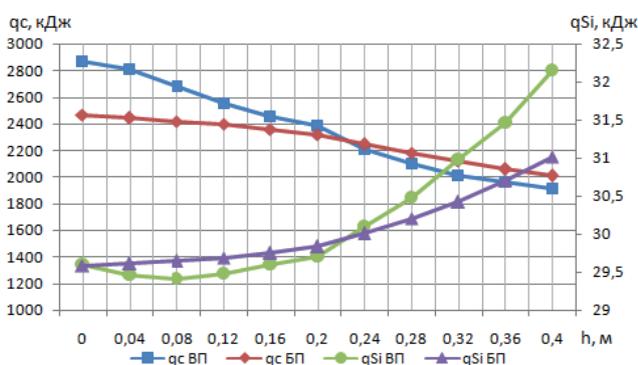


Рис. 5. Количество тепла вносимого горением топлива и силикатами в единичном объеме при использовании различных типов питателей

### 6. Обсуждение результатов

Зная зависимость содержания топлива и химических компонентов шихты от  $d_{cp}$  гранулы [10], можно рассчитать объем выделяемой и поглощаемой энергии в единичном объеме  $P$  рассматриваемого горизонта спекаемого слоя:

$$Q_{\text{выд\_ВП}} = -0,1313d_{cp}^5 + 3,76d_{cp}^4 - 40,5d_{cp}^3 + 202,6d_{cp}^2 - 469,4d_{cp} + 3850;$$

$$Q_{\text{погл\_ВП}} = 0,068d_{cp}^4 - 0,9793d_{cp}^3 + 3,372d_{cp}^2 - 0,9401d_{cp} + 1557;$$

$$Q_{\text{выд\_БП}} = -0,602d_{cp}^5 + 16,99d_{cp}^4 - 179,7d_{cp}^3 + 863,9d_{cp}^2 - 1728d_{cp} + 4263;$$

$$Q_{\text{выд\_БП}} = 0,0193d_{cp}^4 - 0,328d_{cp}^3 + 1,55d_{cp}^2 - 2,958d_{cp} + 1572.$$

Изменение среднего диаметра шихты по высоте паллет агломерационных машин № 2, 4 представлено на рис. 6.

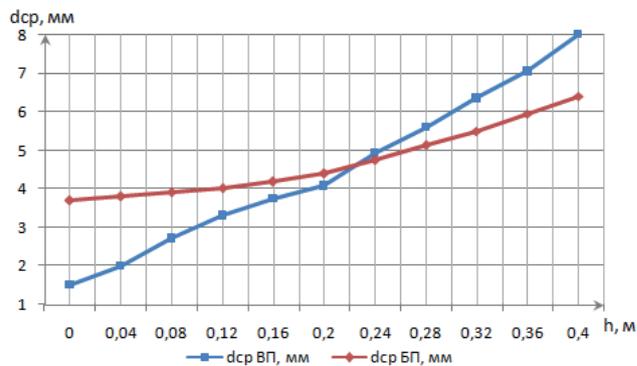


Рис. 6. Закономерность изменения  $d_{cp}$  по высоте паллет машин № 2, №4

Из рис. 6 видно, что применение для загрузки шихты на аглоленту вибрационных питателей ослабляет связи между отдельными частицами в потоке, что в свою очередь, позволяет добиться интенсификации сегрегационных процессов. Последнее обуславливает возможность управления распределением классов крупности материала и как следствие, распределением топлива и химкомпонентов по высоте слоя.

### 7. Выводы

На базе данных, полученных при анализе химического состава шихты аглофабрики МК «Запорожсталь» [10], проведено исследование, направленное на получение зависимостей количества выделяемой и поглощаемой внутренней тепловой энергии в рассматриваемом единичном объеме слоя шихты по высоте слоя от среднего диаметра частицы  $d_{cp}$ .

Установлено, что тип питателя существенно влияет на интенсивность сегрегационных процессов в слое загрузаемого материала, тем самым определяя характер распределения топлива и химкомпонентов.

Полученные результаты позволяют вплотную подойти к вопросу оптимизации теплового режима процесса спекания аглошихты на полученной модели [11, 12], учитывающей внутреннее тепловыделение в единичном объеме, а также установления закономерностей формирования слоя полидисперсной шихты, с целью рационального распределения топлива и химкомпонентов по высоте агломерируемого слоя.

### Литература

1. Базилевич, С. В. Агломерация [Текст] / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1967. – 368 с.
2. Сигов, А. А. Агломерационный процесс [Текст] / А. А. Сигов, В. А. Шурхал. – Киев: Техника, 1969. – 232 с.
3. Бражников, С. Г. Теплотехника окускования железорудного сырья [Текст] / С. Г. Бражников, Ю. А. Берман, Я. Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1970. – 343 с.

4. Фролов, Ю. А. Теплотехническое исследование процесса агломерации и совершенствование технологии и техники для производства агломерата [Текст] : автореф. дис. ... д. т. н / Ю. А. Фролов. – Екатеринбург, 2005. – 49 с.
5. Дмитриева, Е. Г. Совершенствование технологии и оборудования для производства агломерата в условиях работы на тонких концентратах [Текст] / Е. Г. Дмитриева, А. А. Вяткини др. // Сталь. – 2009. – № 2. – С. 4–6.
6. Вяткин, А. А. Метод прогнозирования прочностных свойств агломерата [Текст] / А. А. Вяткин, Е. Г. Дмитриева, А. В. Мылыгин и др. // Бюлл. Черная металлургия. – 2008. – № 3. – С. 44–47.
7. Калашников, С. Н. Математическое моделирование тепло-массообменных процессов в металлургических агрегатах на основе объектно-ориентированной технологии [Текст]: дис. ... д-ра техн. / С. Н. Калашников. – Новокузнецк, 2002. – 278 с.
8. Елисеев, А. А. Исследование тепло-массообменных процессов при агломерации шихты [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: / А. А. Елисеев. – Череповец, 2006. – 165 с.
9. Боковиков, Б. А. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата [Текст] / Б. А. Боковиков, В. В. Брагин, В. М. Малкин и др. // Сталь. – 2010. – № 9. – С. 84–87.
10. Мных, А. С. Исследование влияния фракционного состава агломерационной шихты на распределение химических компонентов слоя материала для условий комбината «Запорожсталь» [Текст] / А. С. Мных // Теория и практика металлургии. – 2014. – № 3 (6). – С. 35–38.
11. Мных, А. С. Решение задачи распределения температуры в единичном объеме агломерационного слоя методом конечных элементов с учетом внутреннего источника тепла [Текст] / А. С. Мных // Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки). – 2014. – № 2(25). – С. 47–51.
12. Мных, А. С. Синтез трехмерной модели теплового режима процесса спекания агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных // Вісник КрНУ (збірник наукових праць). – 2014. - №38 – С. 44-47.
13. Коротич, В. И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке [Текст] / В. И. Коротич – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
14. Минаков, Н. С. Исследование влияния газодинамического режима на показатели процесса агломерации при спекании шихты в высоком слое [Текст] / Н. С. Минаков, Г. А. Арыков, Б. И. Колокольцев и др. // Сталь. – 1994. – № 6. – С. 6–11.
15. Тарасов, П. В. Основные закономерности сопротивления и газопроницаемости зернистого слоя [Текст] / П. В. Тарасов // Сталь. – 2006. – № 3. – С. 12–15.

*Досліджено біологічні властивості води на основі використання методу газорозрядного випромінювання в електромагнітному полі. Розглянутий метод забезпечує експрес-оцінку інтегральних біологічних характеристик зразка рідиннофазного об'єкту. Запропоновано методи та алгоритми цифрової обробки зареєстрованих зображень газорозрядного випромінювання. Виконано класифікацію води різних типів на основі методології кластерного аналізу*

*Ключові слова: газорозрядне випромінювання, якість води, цифрова обробка зображень, кластерний аналіз*

*Исследованы биологические свойства воды на основе использования метода газоразрядного излучения в электромагнитном поле. Рассмотренный метод обеспечивает экспресс-оценку интегральных биологических характеристик образца жидкофазного объекта. Предложены методы и алгоритмы цифровой обработки зарегистрированных изображений газоразрядного излучения. Выполнена классификация воды различных типов на основе методологии кластерного анализа*

*Ключевые слова: газоразрядное излучение, качество воды, цифровая обработка изображений, кластерный анализ*

УДК 546.212

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31546

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ БІОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

Н. В. Глухова

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра метрології та інформаційно-  
вимірювальних технологійДВНЗ «Національний гірничий університет»  
пр. Карла Маркса, 19,  
м. Дніпропетровськ, Україна, 49027  
E-mail: GLNAVI@ukr.net

### 1. Вступ

Науково-дослідні центри різних країн проявляють постійний інтерес щодо теоретичного та експе-

риментального вивчення аномальних властивостей води, які не можна пояснити спираючись на класичні моделі. Нові чисельні дослідження підтверджують той факт, що дійсна природа та властивості