

Із кривих, наведених на графіку (рис.2.6) бачимо, що кут повороту змінюється прямолінійно, тобто пропорційно збільшується при збільшенні висоти уступу, від $\varphi_{n.min1} = 38,8^\circ$ для ЭШ-6/45, і $\varphi_{n.min2} = 34,7^\circ$ для ЭШ-10/50 при $H_{min} = 10$ м, до $\varphi_{n.max1} = 47,0^\circ$ та $\varphi_{n.max2} = 41,9^\circ$ при $H_{max} = 21$ м.

Виконані дослідження дозволили встановити, що ширина заходки та висота уступу значно впливають на величину кут повороту. Дані дослідження можна використовувати для визначення оптимальних параметрів забою, комплексів гірничотранспортного обладнання «ЭШ+автосамоскид», як фактор впливу на продуктивність драглайну.

Список літератури

1. Собко Б.Е. Определение оптимальной ширины заходки экскаватора-драглайна при его работе в комплексе с автосамосвалами / А.М.Маевский, Н.В.Несвитайло, М.А.Чебанов.- Збірник наукових праць НГУ.- 2013.- № 43.-С. 52-58.

*Рекомендовано до друку д.т.н. Симоненком В.І.
Надійшла до редакції 12.10.2014*

УКД 622.8

© В.В. Фомичев, А. А. Слива

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО СПОСОБА ДОБЫЧИ УГЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТРУГА В РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Выполнена оценка эффективности применения гидромеханического разрушения угля с использованием опережающего резания в струговой лаве. Установлена обобщенная зависимость между регулируемыми параметрами резания и уровнем энергозатрат при добыче угля, окруженного горными породами с высокими прочностными характеристиками.

Виконано оцінку ефективності застосування гідромеханічного руйнування вугілля з використанням випереджаючого різання в струговій лаві. Встановлена узагальнена залежність між регульованими параметрами різання і рівнем енерговитрат під час видобутку вугілля, оточеного гірськими породами з високими характеристиками міцності.

The evaluation of the effectiveness of hydro-mechanical destruction of coal using advanced cutting in longwall plow. Established a generalized relationship between controlled cutting parameters and the level of energy consumption in coal mining, surrounded by rocks with high strength properties.

Вступление. Первые опыты по применению струи высокого давления для резки различных материалов относятся к 70-м годам прошлого века. Теперь этот метод находит применение в строительстве, химико-технологическом производстве, добыче полезных ископаемых, как звено технологического процесса изготовления различных изделий и т.д.

Суть гидрорезания заключается в формировании струи обычной воды через небольшое отверстие диаметром 0,1...0,5 мм, с давлением на выходе 1000...3000 бар, при этом скорость истечения воды из сопла составляет 400...1000 м/с. При воздействии такой струи на материал, ее энергия превращается в механическую работу резания, а сама струя является режущим инструментом. Главными достоинствами этой методики резания является отсутствие термических и механических напряжений в месте реза, минимизация ударной нагрузки, отсутствие обратной реакции на режущий инструмент, малая ширина реза.

Актуальность. Гидромеханический способ разрушения угля и горных пород основан на совместном использовании в исполнительных органах горных машин непрерывных струй воды и механического инструмента, режущего или скалывающего действия.

Сущность способа заключается в том, что, струя воды, ориентированная тем или иным путем относительно режущего механического инструмента, позволяет, при взаимодействии с горным массивом, снизить воздействующие на него нагрузки.

Перечислим основные достоинства гидромеханического способа разрушения угля и слабых горных пород:

- повышение энерговооруженности выемочных машин без увеличения габаритов и массы, увеличение скорости их подачи более чем в 2 раза за счет уменьшения усилий резания на резах в 1,5-1,8 раза;
- снижение запыленности атмосферы забоя до уровней, не превышающих предельно допустимых концентраций;
- улучшение сортности добываемого угля.

Существует три группы гидромеханических исполнительных органов, разделяемых по диапазонам низкого, среднего и высокого давления струи воды.

Примером использования струй воды низкого давления в конструкциях проходческих комбайнов являются гидромеханические исполнительные органы, работа основана на разрушении породного массива резами совместно со струями воды давлением около 4 МПа, направленными непосредственно в зону резания. Опыт применения таких комбайнов в Великобритании показал, что их работа характеризуется только небольшим снижением пылеобразования и увеличением срока службы резцов.

Струи воды при среднем давлении так же способствуют снижению пылеобразования в зоне ведения проходческих работ и в более значительной степени снижает износ резцов, однако не обеспечивает ощутимый прирост производительности по разрушению пород. Поэтому, с точки зрения эффективности разрушения горных пород наибольший интерес представляют рабочие органы проходческих комбайнов, в которых используют струи воды высокого давления в сочетании с механическим инструментом.

Фирмами «Роббинс» и «Флоу Рисерч» (США) создан и испытан проходческий комбайн с гидромеханическим исполнительным органом роторного типа. На вращающейся планшайбе диаметром 2 м расположены шарошки и 35

насадок из сапфира диаметром 0,25 мм. Для создания высокоскоростных струй давлением до 420 МПа использовали две параллельно работающие насосные установки мощностью по 360 кВт. При испытаниях, проведенных на гранитах с пределом прочности на одноосное сжатие равным 235 МПа, скорость проходки увеличилась в 1,5-2 раза по сравнению с разрушением механическим способом.

Опыт эксплуатации гидромеханических исполнительных органов проходческих комбайнов позволил выделить следующие основные преимущества гидромеханического способа разрушения горных:

- расширение области применения проходческих комбайнов на более прочные породы (предел прочности на сжатие 180-240 МПа);
- снижение усилий резания на 40-60% и подачи на 60-70%;
- уменьшение крутящего момента и потребляемой мощности на рабочем органе в 1,3-2,2 раза;
- повышение скорости проходки в 1,5-5 раза без увеличения установленной мощности двигателя исполнительного органа;
- уменьшение расхода механического инструмента в 2-6 раз;
- увеличение производительности комбайна при работе по прочным породам в 1,7-2,2 раза при сохранении массы и габаритов машины;
- уменьшение пылеобразования на 70-85% и искрообразования на 90-100%;
- уменьшение расходов на проходку на 30-50%.

Постановка задачи. Однако на пути широкого практического применения гидромеханического способа разрушения горных пород стоят серьезные технические проблемы.

Для эффективного применения в забое необходимо использовать струи воды с начальным давлением не ниже 100 МПа, а для прочных горных пород это значение должно находиться в диапазоне 200 - 500 МПа. Следовательно, проходческий комбайн избирательного действия должен быть оснащен насосом высокого давления, мощность которого равна мощности привода исполнительного органа, а зачастую и превышает ее.

Высокая скорость воды на выходе из формирующей струю устройства обуславливает его значительный абразивный износ, причем стойкость насадки быстро уменьшается с увеличением начального давления. При давлении в 70-80 МПа твердосплавная насадка служит примерно 200 ч, а при давлении в 350 МПа - всего 3-4 ч [1]. Стойкость сапфировых и алмазных насадок в 4-5 раз выше, но в связи с высокой сложностью обработки сапфировых и алмазных заготовок приходится применять не оптимальную форму насадки.

Большую трудность представляет канализация воды по проходческому комбайну и подвод ее к рабочему органу и резцам. По экономическим соображениям потери давления не должны превышать 10-15%, что приводит к большим условным проходам трубопроводов (в том числе гибких рукавов) и различной арматуры.

Все перечисленные проблемы могут быть частично или полностью решены только при условии получения диапазона наиболее приближенных к оптимальным значениям технологических параметров резания для конкретной конструкции добычного или проходческого комбайна. Колебания значений таких параметров должны зависеть от тех горно-геологических условий.

Задачей данного исследования является определение технологических характеристик гидромеханической струговой установки с опережающей гидро-резкой по верхней и нижней границам «уголь – горная порода». Показатели этих технологических характеристик должны с одной стороны обеспечить большую производительность струга, с другой стороны гарантировать возможность эффективной реализации технологии.

К основным управляемым технологическим параметрам, рассматриваемым в данной работе, отнесем связь H_{Δ} «глубина гидрорезки – толщина стружки». Производными от этой связи являются скорости передвижения формирующих струю насадок и резцов струга, величина опережения гидрорезкой основного фронта резания, и абсолютные значения глубины гидрорезки и толщины стружки. Все эти параметры в той или иной мере зависят от прочностных характеристик угля и примыкающих к нему горных пород [2].

Следовательно, определение оптимальных показателей управления работой гидромеханической струговой установки, сводиться к выбору величины давления струи воды на горную породу, величины и характера опережения гидрорезки и скорости перемещения самого струга.

Определение оптимальных характеристик резанья. В рассматриваемой установке реализуется две технологии разрушения материала – это резание с образованием элементной стружки и ударное разрушение водной струей. Физика процесса в обоих случаях имеет различный характер, поэтому для определения степени и вида взаимного влияния необходимо провести анализ воздействия этих процессов на НДС разрушаемых горных пород и угля.

Образование стружки при работе обычного струга имеет достаточно простое физическое описание характерной для процесса резания хрупких материалов [2]. В этом случае под воздействием передней поверхности резца, располагающейся непосредственно у режущей кромки, образуется система трещин распределяющихся в направлении движения резания (рис. 1).

На первом этапе формирования стружки происходит непрерывное повышение силы резания, обеспечивающее развитие ведущей равномерно-подвижной трещины 1. Это продолжается до тех пор, пока решающее значение в формировании элемента стружки не начнет приобретать напряжение изгиба, которое вызывает быстрое падение силы резания, вследствие отделения этого элемента стружки по поверхности 2. На втором этапе происходит зачистка поверхности резания 3, от мелких элементов. В ряде случаев на поверхности резания этот этап отсутствует вследствие развития основной трещины ниже поверхности резания 3. То есть, для системы «уголь - струг» разрушение происходит в виде хрупкого отрыва, обусловленного периодическим процессом раз-

вития опережающей трещины. При этом работа, затрачиваемая на образования стружки пропорциональна поверхности разрушения.

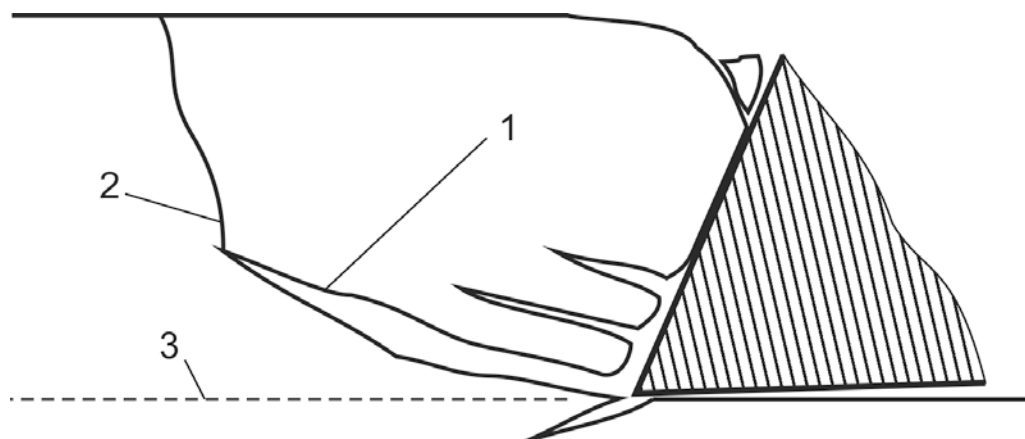


Рис. 1. Формирование системы трещин перед резцом струговой установки

Можно сделать вывод, что в условиях образования элементных стружек срезаемого слоя угля разрушение происходит не по линиям максимальных касательных напряжений, а по линиям разрыва, которые образуются как огибающие линии скольжения. Образовавшиеся поверхности разрыва являются геометрическим местом точек, которые характеризуются резким изменением напряжений. Физически это и обуславливает образование трещины.

Показателем эффективности процесса резания, таким образом, можно считать удельную энергоемкость \tilde{E} , которая является величиной затрачиваемой энергии, приходящейся на единицу пути резания. В общем виде, зависимость этой величины от кинетической энергии струга может быть записана следующим образом

$$\tilde{E} = f(U_K, \sigma_{сж}, l); \quad (1)$$

где U_K - кинетическая энергия струга; $\sigma_{сж}$ - предел прочности угля на сжатие; l - толщина стружки.

Представленная функциональная зависимость имеет вид кривой с несколькими минимумами соответствующими оптимальным показателям энергозатрат. Физически такое поведение функции можно объяснить следующим образом: при малых величинах энергии U_K , значения \tilde{E} велики (процесс не эффективен), с ростом кинетической энергии энергоемкость процесса резания падает, пока не достигнет оптимального минимума, с дальнейшим увеличением U_K величина \tilde{E} опять начинает расти и при нагрузках примерно в двое превышающих первое оптимальное значение образуется второй минимум кривой.

Процесс нарезания щелей в породном массиве струей воды высокого давления (рис. 2) определяется следующими основными характеристиками: давлением воды P и диаметром отверстия формирующей струю насадки, скоростью перемещения насадки S , расстоянием между насадкой и поверхностью породы, количеством проходов струи и прочностными свойствами горной породы [3].

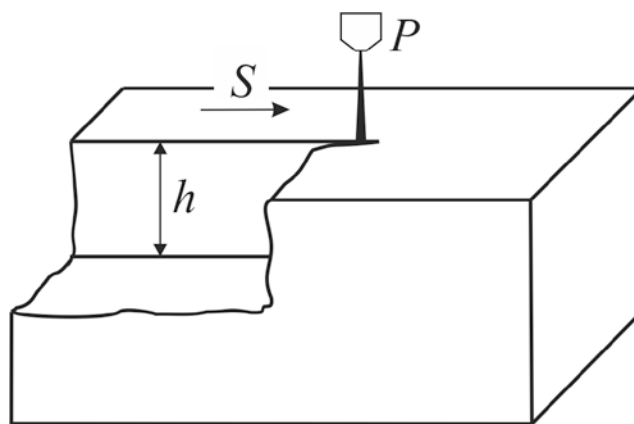


Рис. 2. Схема процесса резания горной породы струей воды высокого давления

Диаметр струеформирующей насадки, расстояние между насадкой и поверхностью породы число проходов струи это те параметры, которые либо слабо поддаются управлению, либо не поддаются управлению вообще. Следовательно, в нашем случае, рассматривать их смысла не имеет.

Поскольку разрушение породы струей воды происходит под действием ударной нагрузки ориентированной строго перпендикулярно разрушаемой поверхности, то основными напряжениями вызывающими формирование щели являются нормальные. Само разрушение не приводит к формированию трещин или зон пластических деформаций, так как порода разрушается мгновенно во всей зоне приложения нагрузки без возникновения краевого эффекта. Поэтому необходимая для резания величина давления струи воды всегда прямо пропорциональна пределу прочности на одноосное сжатие для любого разрушаемого материала.

Таким образом, становится необходимым оценить степень влияния давления воды на глубину щели. Изменение давления воды принималось в диапазоне от 100 до 500 МПа, скорость перемещения насадки вдоль поверхности породы – 25 мм/с. Для этих показателей были получены следующие результаты: повышение давления воды приводит к увеличению глубины щели в 6 раз для горных пород с пределом прочности на одноосное сжатие от 85 МПа и выше, для пород с пределом прочности до 30 МПа глубина возросла в 29 раз. При этом абсолютные показатели глубины щели составили от 3 до 87 мм. Это позволяет говорить о том, что с технологической точки зрения наиболее приемлемой прогнозируемой глубиной опережающего резания для гидромеханического струга является 30 – 40 мм.

С точки зрения технических особенностей реализации наиболее важным можно считать определение оптимальной скорости передвижения струи воды относительно горной породы. Результаты, полученные при проведении исследований [3, 4], позволили сделать однозначный вывод о том, что во всем диапазоне давления воды увеличение скорости перемещения формирующей струю насадки приводит к уменьшению глубины щели h .

Поскольку, в дальнейшем, скорость перемещения насадки V при гидрорезании может стать сдерживающим фактором по определению оптимальных режимов работы гидромеханического струга ее расчетные показатели должны базироваться на учете величины давления воды и прочностных характеристиках горной породы. Зависимость, полученная в ходе экспериментальных работ в [3] выглядит следующим образом

$$V = P^2(\sigma_{сж} \cdot 10^{-2} - 0,9) \cdot 10^{-3} - \sigma_{сж}(6,5P - 0,84) + 0,57P - 50,98; \quad (2)$$

где P - давление воды; $\sigma_{сж}$ - предел прочности породы на сжатие.

Теперь определимся с параметрами опережающего резания при использовании гидромеханической струговой установки. В качестве базовых рассмотрим результаты вычислительных экспериментов проведенных в работе [4]. В ходе исследований был выполнен анализ влияния на удельную энергоемкость разрушения различных комбинаций взаимного расположения резцов.

В случае резания породы, с высокими прочностными характеристиками, группой резцов, был получен, как и следовало было ожидать, значительный прирост усилия резания по сравнению с резанием одиночным резцом. Однако, величина усилия резания для группы резцов не оказалась простой суммой значений одиночных резцов. Разница этого показателя для группы резцов и одиночного резца лежит в диапазоне 10 – 15 %.

Из этого следует важный вывод относительно резания материалов группой резцов. Максимальная эффективность резания соответствует условию суперпозиции НДС создаваемого задними и опережающими резцами. Это условие будет реализовано тогда, когда передние резцы опережают задние на величину, равную расстоянию от свободной грани модели до места излома линии, вдоль которой происходит разрушение. При условии равенства глубин резания резцов это означает приблизительное равенство величин опережения и глубины резания.

Для оценки эффективности опережающего резания воспользуемся приведенной удельной энергоемкостью разрушения породы

$$\tilde{E}_f = \frac{\tilde{E}}{\tilde{E}_{\min}}; \quad (3)$$

где

$$\tilde{E} = \frac{E}{hl} = \frac{1}{hl} \int_{l_0}^{l_1} F(l) dl = \frac{V_s}{hl} \int_{t_0}^{t_1} F(t) dt;$$

\tilde{E}, E - удельные и полные энергозатраты резания соответственно; \tilde{E}_{\min} - минимально возможные энергозатраты резания; $F(t), F(l)$ - усилия резания как функции от времени и длины среза; V_s, h, l - скорость, глубина и длина выполненного среза соответственно.

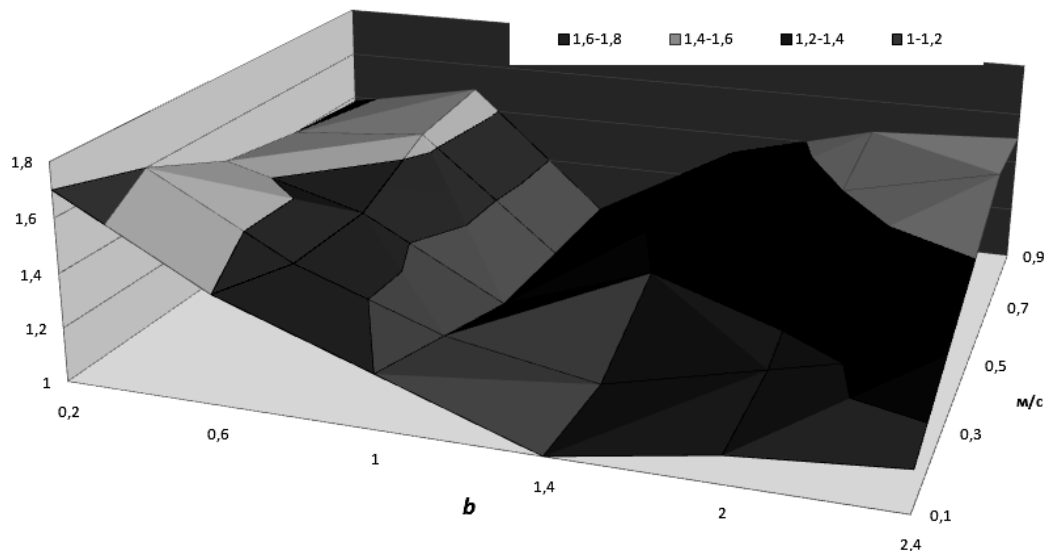


Рис. 3. Зависимость приведенной удельной энергоемкости разрушения от скорости резания и соотношения b длины опережения и глубины реза

Как видно на рис. 3 минимумы удельной энергоемкости разрушения горной породы находятся в диапазоне значений от 0,9 до 1,38 параметра b . Причем с ростом скорости резания для значений этого параметра в диапазоне 0,2 – 0,4 наблюдается снижение удельной энергоемкости разрушения материала. Это может быть использовано при выборе оптимальных показателей управления процессом резания.

Поскольку, как было показано выше, ни в одном виде разрушений, при использовании гидромеханического струга, не наблюдаются пластические деформации, последующее решение может быть выполнено в рамках линейной механики разрушений.

При использовании обычной струговой установки формирование трещин, благодаря которым происходит срез угля, осуществляется за счет двух физических составляющих: перемещения берегов трещины вдоль нормали к ее исходной поверхности и деформации сдвига параллельно фронту трещины. Зачастую в пространственной задаче с криволинейным фронтом трещины особенность напряжений значительно отличается от корневой [5].

Энергетический интеграл, иначе интеграл Черепанова-Райса, не зависит от выбора контура интегрирования и поэтому называется инвариантным. Для рассматриваемого случая, обозначим J – интеграл в случае роста трещины в направлении оси перемещения струга символом J_x , а при приращении длины трещины в направлении перпендикулярном оси перемещения символом J_y . Тогда направление роста трещины из вершины совпадает с вектором суммарного изменения энергии J , компоненты которого определяются следующим образом

$$\begin{aligned}
 J_x &= \frac{(1+\nu)(1+k)}{4E} (K_I^2 + K_{II}^2); \\
 J_y &= \frac{(1+\nu)(1+k)}{2E} K_I K_{II};
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где K_I, K_{II} - коэффициенты деформирования трещин; $k = 3 - 4\nu$ для плоской деформации; $k = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ для плоского напряженного состояния; ν - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости.

Теперь учитывая весь комплекс энергозатрат при работе гидромеханического струга и установив механическую связь между основными характеристиками разрушения материала под воздействиями различных сред была получена следующая функциональная зависимость

$$\tilde{E}_{II} = \frac{K_{II}^{0,57} \cdot V(0,92 - n \cdot S \cdot l)}{K_I \cdot V_s \cdot l_s} = \frac{K_{II}^{0,57} \cdot V(0,92/l - n \cdot S)}{K_I \cdot V_s} H_{\Delta}; \quad (5)$$

где S - величина опережения резания; V_s, l_s - скорость перемещения и глубина резания основной каретки струга; n - число проходов струи воды при опережающем резании.

Выводы. Определяющим фактором, влияющим на выбор оптимальных характеристик работы гидромеханического струга, является величина давления струи воды. При этом, баланс энергозатрат на единицу добытого угля, стремится к наименьшему минимуму когда H_{Δ} находится в диапазоне значений от 0,8 до 1,3. Однако, технологическое обеспечение таких значений H_{Δ} не имеет смысла из-за высоких абсолютных значений энергозатрат. Поэтому наиболее приемлемой является величина, находящаяся в диапазоне от 0,2 до 0,4.

Прочностные характеристики угля и пород оказывают на характеристики резания гидромеханического струга, тем большее значение, чем выше их разница. Влияние прочности угля и пород имеет нелинейный характер с максимумом в зоне наименьшей абсолютной разности этих показателей.

Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы для управления процессом добычи угля с применением гидромеханического струга в широком диапазоне горно-геологических условий с применением автоматизированных систем управления производством, поскольку позволяет оперировать четко установленными признаками.

Список литературы

1. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. / - М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. / - М.: Наука, 1974. – 640 с.
3. Бренер В.А., Жабин А.Б., Поляков А.В. Результаты исследований процесса разрушения горных пород струями воды сверхвысокого давления // Горное оборудование и электромеханика. - 2006. - № 6. - С. 29-32.
4. Костандов Ю.А. Особенности поведения материалов при инструментальном резании // Динамические системы. Вып. 21 – 2006. – С. 107-114.
5. Брок Д. Основы механики разрушения. / - М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Дриженком А.Ю.
Надійшла до редакції 11.12.2014*