

УДК 622.276:532.5

Усов О.А. канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

**ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА ФИЛЬТРАЦИИ
ВОДЫ РЕАЛЬНОЙ ДИНАМИКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ
НАГНЕТАНИИ В УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ**

Усов О.О. канд. техн. наук, ст. науч. співр.
(ИГТМ НАН України)

**ОЦІНКА ВІДПОВІДНОСТІ ЛІНІЙНОГО ЗАКОНУ ФІЛЬТРАЦІЇ ВОДИ
РЕАЛЬНІЙ ДІНАМІЦІ ЗМІНИ ЇЇ ТИСКУ ПІД ЧАС НАГНІТАННЯ У
ВУГІЛЬНІ ПЛАСТИ**

Usov O.A., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

**ESTIMATION OF ACCORDANCE OF THE WATER FILTRATION LINEAR
LAW TO THE REAL PRESSURE DYNAMICS OF WATER INFUSED INTO
THE COAL LAYERS**

Аннотация. Выполнен теоретический анализ влияния расхода жидкости и времени нагнетания на давление в скважине при линейном законе фильтрации Дарси. Учитывалось влияние упругих свойств, формы и ориентации скважин относительно границ угольного пласта и зависимость его проницаемости от гидравлического давления. Показано, что при двухмерной фильтрации давление в скважине является постоянно возрастающей функцией времени нагнетания. Эта теоретическая зависимость принципиально не соответствует практическим данным, по которым давление всегда стабилизируется после определенного времени нагнетания. А при нелинейном законе фильтрации характер теоретических и практических зависимостей совпадает. Теоретическая форма индикаторной диаграммы и для линейного и для нелинейного закона фильтрации зависит от удачного выбора математической связи давления с проницаемостью пласта.

Ключевые слова: проницаемость, расход воды, давление воды, индикаторная диаграмма, бародинамическая диаграмма, горное давление.

1. Актуальность. Для борьбы с внезапными выбросами применяется нагнетание в угольный пласт воды под высоким давлением. Скважины для нагнетания чаще всего бурятся из подготовительных выработок в плоскости простирания угольного пласта на глубину до 8м, устье скважины изолируется герметизатором на глубину до 6м. Иногда скважины бурятся под углом к угольному пласту через породную пробку между ним и проводимой горной выработкой.

В процессе нагнетания измеряется давление в скважине и расход воды. Эти данные позволяют получить индикаторную и бародинамическую диаграммы. Их использование для последующей адекватной расчетной оценки фильтрационных свойств пласта является актуальной задачей [1].

Индикаторная диаграмма устанавливает связь между давлением в скважине P и расходом воды Q . Ее получают быстрым (по сравнению с общей длительностью нагнетания) изменением расхода воды. Бародинамическая диаграмма устанавливает связь между давлением P в скважине и временем t нагнетания при постоянном расходе воды.

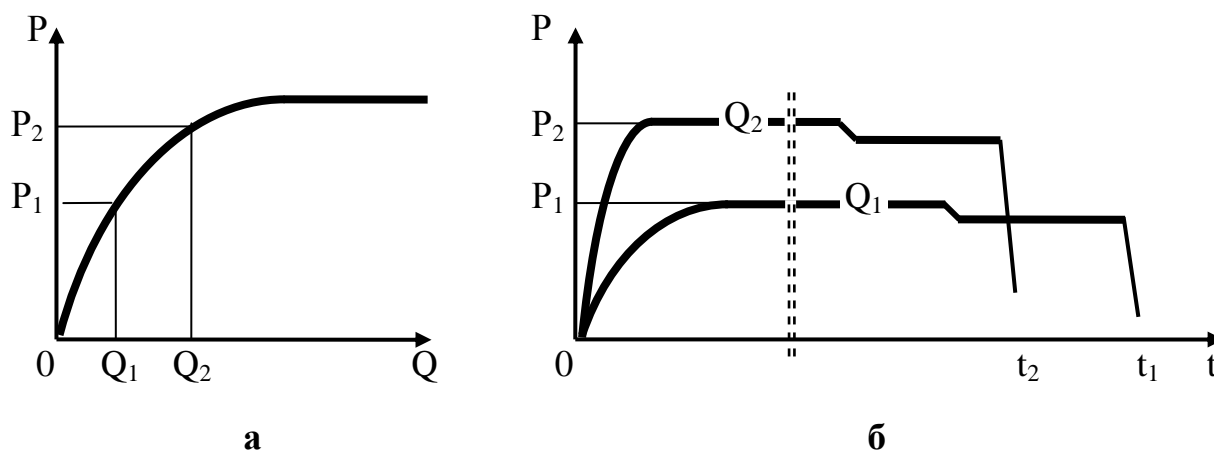


Рисунок 1 – Индикаторная (а) и бародинамическая (б) диаграммы угольного пласта

Общий вид этих диаграмм (рис.1) носит универсальный характер для всех пластов Донецкого (Украина) и Кузнецкого (Россия) бассейнов во всем диапазоне гидравлических режимов и геометрических параметров скважин.

Разумеется, величины давления, расхода и времени нагнетания для разных пластов различны, но характерный признак – стабилизация давления – наблюдается всегда.

2. Цель работы – установить степень соответствия характерной асимптотики индикаторных и бародинамических диаграмм теоретическим представлениям о процессе фильтрации жидкости в угольных пластах.

Теория процесса базируется на решении двух уравнений. Первое выражает закон движения жидкости в трещиновато-пористой среде и связывает компоненты скорости u_i с градиентом давления dP/dx_i

$$(u_i)^j = -k \partial P / \partial x_i \quad (1)$$

Если показатель степени $j = 1$, получается линейный закон фильтрации (Дарси), который использовался и используется во всех исследованиях процесса нагнетания воды в угольный пласт [1,]. Если $j = 2$, то получается нелинейный закон фильтрации (Краснопольского), который часто используется в подземной гидравлике нефтяных пластов.

Второе уравнение выражает условие неразрывности потока жидкости и связывает градиенты компонент скорости $\partial(\rho u_i) / \partial x_i$ с изменением упругой гидравлической емкости (ρm) рассматриваемой области пласта

$$\partial(\rho u_1)/\partial x_1 + \partial(\rho u_2)/\partial x_2 + \partial(\rho u_3)/\partial x_3 = -\partial(\rho m)/\partial t \quad (2)$$

где: ρ – плотность жидкости; m – пористость пласта.

Чтобы из этих уравнений получить динамическую диаграмму, нужно еще знать значения координат контура нагнетания u_{ik} в каждый момент времени. Для этого автором [2] ранее было предложено использовать уравнение материального баланса в форме, связывающей объем жидкости, находящейся в пласте ($\iiint m \partial u_1 \partial u_2 \partial u_3$) в момент времени t с объемом жидкости ($\int Q dt$), поданной в скважину к этому моменту времени

$$\int^t Q dt = \int^{u_{1k}} \int^{u_{2k}} \int^{u_{3k}} m \partial u_1 \partial u_2 \partial u_3 \quad (3)$$

где: Q – расход жидкости; m – пористость пласта, а нижние пределы интегрирования равны 0.

Например, при двухмерной плоскорадиальной фильтрации в недеформируемом пласте мощностью h с постоянным расходом воды Q уравнение (3) примет вид

$$Qt = m h \pi R_k^2 \quad (4)$$

откуда легко получить зависимость радиуса контура r_k от времени нагнетания t в виде

$$R_k = [Qt / (m h \pi)]^{0,5} \quad (5)$$

Системы уравнений (1–3) достаточно для теоретического построения динамической диаграммы. Однако, точное решение Томпсона – Кельвина уравнения (2) для простейшего случая двухмерной (плоскорадиальной) фильтрации воды по линейному закону Дарси уже содержит интегральную показательную функцию Ei , не выражающуюся в конечном виде. Приближенное решение, определяемое, например, формулой (XII.30) работы [3], имеет вид

$$4\pi h K (P_c - P_k) = Q \ln(4\chi t / R_c^2) - 0,577Q \quad (6)$$

и выражает динамику роста давления P_c в скважине, пробуренной перпендикулярно бесконечному пласту мощностью h с начальным давлением P_k , с постоянным расходом Q нагнетаемой жидкости.

Сложности с решением полного уравнения (2) привели к широкому использованию его неполного вида, в котором отсутствует переменная правая часть

$$\partial(\rho u_1)/\partial x_1 + \partial(\rho u_2)/\partial x_2 + \partial(\rho u_3)/\partial x_3 = 0 \quad (7)$$

Физически это уравнение неразрывности потока соответствует случаю фильтрации несжимаемой жидкости в недеформируемом пласте. Его решение для линейного закона Дарси двухмерной (плоскорадиальной) фильтрации выражается формулой Дюпюи (см., например, (IV.51) работы [3])

$$2\pi h K (P_c - P_k) = Q \ln (R_k / R_c),$$

подставляя в которую радиус контура нагнетания R_k из выражения (5), получим уравнение бародинамической кривой для скважины, пробуренной перпендикулярно бесконечному пласту, мощностью h с начальным давлением P_c , с постоянным расходом Q нагнетаемой жидкости в виде

$$4\pi h K (P_c - P_k) = Q \ln [Qt / (m h \pi R_c^2)] \quad (8)$$

Сравнение уравнения (8) с уравнением (6) показывает, что их левые части совпадают, а правые, хотя и не совпадают полностью, но содержат одну и ту же логарифмическую функцию времени, отличающуюся только коэффициентами. Таким образом, учет упругости пласта и жидкости не изменяет характера бародинамической кривой, если нагнетаемая жидкость полностью вытесняет пластовый газ. В случае частичной консервации газа жидкостью учет его упругости может повлиять на характер бародинамики. Однако, в связи с полной теоретической не разработанностью и отсутствием экспериментальных измерений, в этой статье не рассматривается.

Поскольку уравнения (2) и (7) приводят к совпадающим результатам по бародинамике, в дальнейшем будет использоваться упрощенное уравнение неразрывности (7), не учитывающее влияние давления на пористость пласта и плотность жидкости, а в уравнении (3) пористость будет считаться постоянной величиной.

Такой подход позволяет решать уравнение неразрывности (7) и материального баланса (3) без учета связи входящих в них параметров с градиентом давления, определяемой законом фильтрации (1).

Это позволило автору [4] получить теоретическое выражение бародинамической кривой для трехмерной фильтрации, характерной на начальной стадии нагнетания ($t \leq t_2$) через скважину, расположенную в плоскости простирания пласта в виде

$$Qt = A e^F (1 + B e^F) / (1 - B e^F)^3 \quad (9)$$

и для двухмерной фильтрации на следующей стадии нагнетания, после выхода воды к кровле и почве пласта ($t > t_2$) в виде

$$Q(t - t_2) = C e^{(F - F_2)} \quad (10)$$

где: A, B, C – коэффициенты; t_2, F_2 – значения параметров в момент достижения водой кровли и почвы пласта; L – длина скважины;

$$F = 4\pi L K (P_c - P_k) / Q \quad (11)$$

Уравнения (9,10) получены на основе закона Дарси. Сравнение выражений (10) и (8), которое с учетом (11) можно переписать в виде

$$Q t = D e^F, \quad (12)$$

показывает, что процесс нагнетания жидкости в пласт из скважин пробуренных по простиранию и вкрест простирания пласта описывается подобными бародинамическими кривыми. Т.е. изменение ориентации скважины не влияет на бародинамику процесса. А вот изменение геометрии потока оказывает принципиальное влияние. Переход от двухмерной фильтрации (12 или 10) к трехмерной (9) добавляет к правой части бародинамических уравнений асимптотический знаменатель.

Этот знаменатель обращается в 0 при конечном значении функции F , а значит, и давления P_c . Иными словами, при любой длительности нагнетания в пласт неограниченных размеров давление в скважине не поднимается выше некоторого значения, пропорционального расходу воды. И теоретическая бародинамическая диаграмма, с некоторым приближением, соответствует экспериментальной на рис.1б.

Асимптотика бародинамической диаграммы наблюдается и при трехмерной фильтрации из сферического источника по линейному закону Дарси. Записав соответствующую классическую формулу (см., например, (IV.32) работы [3]) с учетом (11), получим

$$1/R_c - 1/R_k = 2\pi K (P_c - P_k) / Q \quad (13)$$

Выражая R_k через t по уравнению (3) для сферического контура нагнетания и предполагая что радиус сферической скважины R_c намного меньше R_k , получим

$$R_k^3 - R_c^3 = 3Q t / (4\pi m) \\ R_k = [3Q t / (4\pi m) + R_c^3]^{1/3} \quad (14)$$

Подставив (14) в (13) получим уравнение бародинамической диаграммы при нагнетании из сферической скважины

$$2\pi K (P_c - P_k) = Q / R_c - Q / [3Q t / (4\pi m) + R_c^3]^{1/3} \quad (15)$$

Левая часть этого уравнения равна 0 при $t = 0$ и ограничена величиной Q / R_c при $t \rightarrow \infty$. Несмотря на различия в математических выражениях бародинамических диаграмм трехмерной фильтрации из сферического (15) и линейно протяженного источника (9) их графическая форма одинакова.

Обобщая полученные результаты можно сделать два вывода:

- графическая форма бародинамических диаграмм не зависит от геометрии скважины, а зависит только от геометрии потока;
- теоретическая форма бародинамических диаграмм, полученных для двухмерного потока из линейного закона фильтрации Дарси и условия постоянной проницаемости пласта, не содержит асимптотических членов.

Поэтому, при теоретических расчетах давление неограниченно возрастает с

ростом времени нагнетания, что принципиально не соответствует экспериментальным бародинамическим кривым.

Для завершения анализа теоретических результатов, полученных с применением линейного закона Дарси, рассмотрим вариант изменения коэффициента фильтрации K в зависимости от давления нагнетаемой жидкости P . Такая зависимость подтверждается как прямыми экспериментальными измерениями расхода воды через образцы угля [5], так и асимптотической формой индикаторной кривой на рис. 1а. А при постоянном коэффициенте фильтрации в линейном законе давление должно быть строго пропорционально расходу. Это следует из анализа формул (15, 9) для трехмерного и (12, 10) для двухмерного потока в которых надо принять $t = \text{const}$.

В гидромеханике пористых сред давно разработан метод учета влияния давления P на коэффициент фильтрации $K(P)$ с помощью потенциальной функции давления (функции Лейбензона)

$$\varphi = \int K(P) dP \quad (16)$$

Уравнение Дюпюи, записанное через потенциальную функцию давления φ , примет вид

$$2\pi h (\varphi_c - \varphi_k) = Q \ln (R_k/R_c), \quad (17)$$

а уравнение (8) переписется как

$$4\pi h (\varphi_c - \varphi_k) = Q \ln [Qt / (m h \pi R_c^2)] \quad (18)$$

Проанализируем уравнение (18). Его правая часть $\rightarrow \infty$ при $t \rightarrow \infty$. Значит, и левая часть должна $\rightarrow \infty$ при $t \rightarrow \infty$. Если функция $\varphi_c \rightarrow \infty$ при давлении $P \rightarrow \infty$, то бародинамическая кривая, по-прежнему, не имеет характерного участка стабилизации.

Допустим, что функция $\varphi_c \rightarrow \infty$ при конечном давлении P_1 (функция $\varphi_k = \text{const}$). Тогда значение давления P_1 обращает левую часть в бесконечность при любом расходе (и Q_1 , и Q_2), поскольку функция φ_c от расхода никак не зависит. А это прямо противоречит наблюдаемой зависимости установившихся значений давления от расхода, изображенной на рис. 1б, на котором давление P_1 соответствует расходу Q_1 , а расходу Q_2 соответствует давление P_2 .

Таким образом, учет влияния давления на коэффициент фильтрации в законе Дарси не устранил принципиальное различие между теоретической и экспериментальной формами бародинамической диаграммы для двухмерного потока.

В то же время уже известные результаты теоретического применения нелинейного закона фильтрации для двухмерного потока легко решают эту проблему. Записав, например, левую часть и второй член правой части формулы (IV.45) работы [3] в принятых нами обозначениях, получим для любого показателя степени $j > 1$ в уравнении (1)

$$(\varphi_c - \varphi_k) = Q^j (1/R_c^{j-1} - 1/R_k^{j-1}) / (2\pi h)^j \quad (19)$$

Эта формула обладает явно выраженной асимптотикой сомножителя $(1/R_c^{j-1} - 1/R_k^{j-1})$ в правой части. При $t \rightarrow \infty$ радиус контура R_k тоже стремится к бесконечности. Выражение $(1/R_c^{j-1} - 1/R_k^{j-1}) \rightarrow 1/R_c^{j-1}$, а потенциальная функция давления в скважине φ_c ограничена величиной:

$$\varphi_c = Q^j / [2\pi h]^j R_c^{j-1} + \varphi_k \quad (20)$$

При этом, в отличие от линейного закона, величина потенциала давления φ_c (и самого давления P_c) при $t \rightarrow \infty$ зависит от расхода воды Q .

Таким образом, характерные особенности экспериментальной бародинамической диаграммы автоматически соблюдаются при использовании одночленного нелинейного закона фильтрации при любом $j > 1$.

Соответствует ли нелинейный закон фильтрации экспериментальной индикаторной диаграмме?

При постоянном коэффициенте фильтрации K и нелинейный, и линейный законы фильтрации не соответствуют экспериментальной форме индикаторной диаграммы. Ее форма, определяемая уравнениями (20, 17, 16) для $R_k \approx const$, имеет вид $P_c \sim Q^j$ при нелинейном и $P_c \sim Q$ при линейном законе. Если взять показатель степени $j=2$ (закон Краснопольского), то $P_c \sim Q^2$

Однако, если учесть зависимость коэффициента фильтрации от давления, например в форме (III.12) работы [3]

$$K(P) = K e^{a(P-P_0)}, \quad (21)$$

то потенциал давления, определяемый (16), примет вид

$$\varphi_c = (K/a) e^{a(P-P_0)}, \quad (22)$$

а форма индикаторной кривой из уравнений (20, 17) после подстановки туда (22) примет вид $P_c \sim \ln Q$ и для нелинейного, и для линейного законов фильтрации. Логарифмическая форма индикаторной диаграммы гораздо ближе соответствует ее экспериментальному виду, хотя и не является асимптотической – в этом ее недостаток.

Рассмотренный пример показывает, что форма индикаторной диаграммы определяется не законом фильтрации, а удачным выбором математической связи давления с коэффициентом фильтрации. В этом плане формула (III.12) работы [3] не является единственной известной, там же анализируется степенная зависимость четвертого порядка для трещиноватых пластов.

Применительно к углям кроме (21) предлагалась линейная зависимость коэффициента фильтрации от давления [5]. Однако, для углей этот вопрос проработан явно не достаточно и поиск математической связи коэффициента фильтрации с давлением, отвечающей экспериментальным индикаторным диаграммам, является актуальной задачей. Целесообразно увязать функцию $K(P)$ с по-

казателем степени j в нелинейном законе фильтрации. Такая увязка позволит в качестве базы использовать не лабораторные эксперименты, а данные промышленных гидравлических испытаний скважин, лучше отражающие особенности угольных пластов в естественных условиях их залегания.

Использование в дальнейших исследованиях нелинейного закона фильтрации не отменяет частных выводов, сделанных по ходу статьи, об отсутствии влияния формы и ориентации скважины относительно границ угольного пласта на характер его индикаторных и бародинамических диаграмм. Это объясняется тем, что поле скоростей фильтрации на линиях тока, перпендикулярных эквипотенциальным поверхностям определялось из решения уравнения (7), не зависящего от связи скоростей с давлениями.

Вопрос о совпадении характера бародинамической кривой для жесткого и упруго-напорного режима при нелинейном законе фильтрации остается открытым.

Выводы

1. Линейный закон фильтрации не соответствует реальной динамике изменения давления нагнетания воды в угольный пласт.

2. Результаты гидравлических исследований скважин описываются нелинейным одночленным законом фильтрации с обязательным учетом влияния давления на проницаемость угольных пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анпилогов, Ю.Г. Оперативная оценка эффективности гидродинамического воздействия на угольный пласт по изменению его проницаемости / Ю.Г. Анпилогов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №8 «Экология, безопасность». — М.: МГГУ, 2011. — с.137-145.

2. Васильев, Л.М. Определение рациональных режимов нагнетания жидкости в пласт угля / Л.М. Васильев, О.А. Усов // Известия ВУЗов. Горный журнал. — 1980.- №12.-С.3-7.

3. Пыхачев, Г.Б. Подземная гидравлика. Учебное пособие / Г.В. Пыхачев, Р.Г. Исаев. - М.: Недра, 1972 – 360 с..

4. Усов, О.А. Установление закономерностей фильтрации жидкости для повышения эффективности увлажнения угольных пластов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11 / О.А. Усов. – Днепропетровск: ИГТМ, 1985. – 21 с.

5. Чернов, О.И. Подготовка шахтных полей с газовыбросоопасными пластами / О.И. Чернов, Е.С. Розанцев. - М.:Недра, 1975. - 287 с.

REFERENCES

1. Anpilogov, Yu.G. (2011) "The conformance operation effect hydrodynamic of the change permeability for coal beds», *Gorny informatsionno-analitichesky bulletin*, no. 8, pp. 137-145.

2. Vasilyev, L. M. and Usov, O.A. (1980) «The definition rationals rejims of penetration liquid for coal bed», *Izvestiya VUZo.Gorny Zhurnal*, no.12, pp. 3-7.

3. Pyhathev, G.B. and Isaev, R.G. (1972) *Podzemnaya hidravlika* [The hydraulique underground], Nedra, Moscow, SU.

4. Usov, O.A. (1985) «The establish law filtration liquid for rise effect of penetration coals beds», Abstract of Ph. D. dissertation, 05.15.11, IGTM, Dnepropetrovsk, SU.

5. Chernov, O.I. and Rozantsev, E.S. (1975), *Podgotovka shakhtnykh poley s gazovybrsoopasnymi plastami* [The preparation main fields with gas- throw- dangerous beds], Nedra, Moscow, SU.

Об авторе

Усов Олег Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Нацио-

нальній академії наук України (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Україна, usov_o_a@mail.ru

About the author

Usov Oleg Aleksadrovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in the Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, usov_o_a@mail.ru

Анотація. Виконано теоретичний аналіз впливу витрати рідини і часу нагнітання на тиск в свердловині при лінійному законі фільтрації Дарсі. Враховувався вплив пружних властивостей, форми і орієнтації свердловин щодо меж вугільного пласта і залежність його проникності від гідравлічного тиску. Показано, що при двомірній фільтрації тиск в свердловині є постійно зростаючою функцією від часу нагнітання. Ця теоретична залежність принципово не відповідає практичним даним, за якими тиск завжди стабілізується після певного часу нагнітання. А при нелінійному законі фільтрації характер теоретичних і практичних залежностей збігається. Теоретична форма індикаторної діаграми і для лінійного і для нелінійного закону фільтрації залежить від вдалого вибору математичної функції зв'язку тиску з проникністю пласта.

Ключові слова: проникність, витрата води, тиск води, індикаторна діаграма, бародинамічна діаграма, гірський тиск.

Abstract. The theoretical analysis of influencing of expense of liquid and time of festering on pressure in a mining hole at the linear law of the Darcy filtration is executed. Influencing of resilient properties, forms and orientations of mining holes in relation to the scopes of coal layer and dependence of his permeability from hydraulic pressure was taken into account. It was shown that with 2D filtration process the well pressure behaves as constantly increasing, injection time-dependent function. This theoretical dependency doesn't correspond fundamentally to the obtained results from the field tests which show the stabilization of the well pressure after certain time of water injection. But the characters of theoretical and practical dependencies coincide if applying the non-linear filtration law. The theoretical form of the indicator diagram for linear and non-linear filtration law depends on the right choice of the mathematical relation between pressure and coal bed permeability.

Keywords: permeability, water flow rate, water pressure, indicator diagram, dynamic diagram, rock pressure.

Статья поступила в редакцию 25.11. 2014

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Л.М. Васильевым