

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРЕПЕЙ КАПИТАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**¹Шейко А. В.**¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КРІПЛЕНЬ КАПІТАЛЬНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК****¹Шейко А.В.**¹*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***VALIDATION OF SUPPORT PARAMETERS FOR THE MAIN WORKINGS****¹Sheiko A.V.**¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Science of Ukraine*

Аннотация. Для обоснования параметров крепей капитальных горных выработок, сооружаемых в слабометаморфизованных породах, изучены закономерности изменения параметров разных сторон проявлений горного давления в горных выработках. Для обеспечения устойчивости выработок, сооружаемых в слабометаморфизованных породах, применяют металлические арочные и металлобетонные крепи с упрочнением или без упрочнения пород. Проектные параметры крепей обосновывают по нормативным методам, которые неприемлемы для условий слабометаморфизованных пород. Для обоснования параметров крепей выработок, сооружаемых в слабометаморфизованных породах, изучены закономерности проявления основных сторон горного давления: выпучивания пород кровли и почвы выработок, обвалы пород кровли, реактивный отпор крепи смещающимся породам, с учетом и без учета упрочнения пород водоцементными растворами и анкерами. Установлены взаимосвязи и соразмерности геомеханических и технических параметров систем "порода-крепь". На основании положений механики сплошной среды и установленных опытным путем закономерностей разработан эмпирико-аналитический метод определения несущей способности зоны неупругих деформаций, с учетом и без учета упрочнения породного контура. Путем инженеринговых исследований разработана математическая модель несущей способности арочной рамы, комплексно учитывающая тип специального вида профиля, площадь поперечного сечения выработки, жесткость рамы и вид нагрузки на свод арки. Экспериментально изучено влияние времени усиления породного контура на геомеханические параметры систем "порода- крепь" и впервые подтвержден теоретический вывод о возможности обеспечения устойчивости выработок путем использования несущей способности упрочненного контура, без использования традиционных крепей как несущих конструкций. Обоснованы нагрузки на крепь выработок, с учетом основных влияющих природных и технических факторов. На основании выполненных исследований разработаны: типовой проект и технические условия на податливые арочные и шатровые крепи и специального шахтного профиля СВП, а также новые породные крепи.

Ключевые слова: геомеханика, анкера, тампонаж, породобетон.

Для обоснования параметров крепей капитальных горных выработок, сооружаемых в слабометаморфизованных породах, изучены закономерности изменения параметров разных сторон проявлений горного давления в горных выработках:

- закономерность выпучивания пород почвы выработки, проявляющаяся путем образования породных шатровых складок, отличающиеся тем, что длина стрелы выпучивания увеличивается во времени с затухающей скоростью и стабилизируется по величине f_{\max} , равной одной третьей произведения пролета ослабления выработки L на разницу критериев Ю. З. Заславского

$$f_{\max} = 0,33 \cdot L \cdot (Z_a^B - Z_a^K), \quad (1)$$

где $Z_a^B = \gamma \cdot \frac{H}{\sigma_{сж}}$ – критерий Ю.З. Заславского, равный отношению геостатического давления γH к пределу прочности породы на простое сжатие $\sigma_{сж}$ на глубине H заложения выработки; Z_a^K – критическое значение критерия, при котором $f_{\max} = 0$.

Для условий Западного Донбасса $Z_a^K = 0,06$. Достоверность закономерности (1) подтверждена независимыми исследованиями Б.М. Усаченко, В.Я. Кириченко и В. А. Шмиголя [2];

- закономерность влияния фактора времени на длину стрелы выпучиваемых пород, которая равна произведению f_{\max} на дробно-линейную функцию времени с числителем, равным текущему времени τ и знаменателем, равным сумме текущего τ и условного времени τ_y , влияющего на темп затухания выпучивания пород, и зависящего от глубины заложения выработки и прочности пород

$$f = f_{\max} \cdot \frac{\tau}{\tau_y + \tau}, \quad (2)$$

где $\tau_y = \frac{f_{\max}}{v_o}$; v_o – максимальная скорость движения вершины выпучиваемого

слоя почвы выработки вблизи породного забоя, $v_o = L \cdot (Z_a^K + 0,1 \cdot Z_a^B)$;

- сопоставительным анализом расчетных данных для пород кровли (по методике Б.М. Усаченко) и для пород почвы (формулы 1 и 2) установлено, что качественные и количественные закономерности выпучивания слоистых (слабометаморфизованных) пород кровли и почвы выработок аналогичны (таблица 1).

Таблица 1 - Смещения пород кровли и почвы при изменении величины критерия Ю. З. Заславского

Величина критерия Ю.З. Заславского	Смещения пород, мм		
	кровли, по формулам Б.М. Усаченко (при $\tau = 400$ сут. 1972 г.)	почвы, по формуле автора (1982 г.)	
		при $\tau = 400$ сут.	при $\tau \rightarrow \infty$
0, 2	185	166	184
0, 3	280	274	316
0, 4	380	370	448
0, 5	474	460	580

Если в почве выработки залегают породы комковатой текстуры, то смещение пород кровли меньше, чем пород почвы.

На основании шахтных наблюдений даны описание, объяснение причин и

прогноз явления вывалообразования, установленных по данным визуальных наблюдений:

а) в выпучиваемых слоях пород зоны неупругих деформаций образуются три центра изгиба (центральный и два боковых), трансформирующиеся в центры разрушения, и два вида саморазрушенных пород: сыпучих и повышено трещиноватых (разрушеносвязных);

б) сыпучие породы в поперечном сечении имеют форму трапеции, с наклоном боковых сторон к плоскости напластования под углом 65-70°;

в) сыпучие породы давят на крепь собственным весом и создают отпор породам, расположенным за контуром зоны обрушения;

г) после извлечения крепи погашаемой выработки, обрушение пород происходит прерывисто в следующей последовательности: сыпучие → разрушеносвязные → расположенные выше контура трапеции первоначального обрушения, с интервалом времени в несколько суток и даже месяцев;

д) разрушеносвязные породы склонны к обрушению и обрушаются, при их увлажнении или при опускании сыпучих пород, создавая динамическую нагрузку на крепь и являясь причиной как завалов выработок, так и дальнейшего развития процесса вывалообразования;

е) явление вывалообразования не происходит, если в непосредственной кровле выработки расположена "порода-мост": слои песчаников, известняков или угольный пласт;

ж) если "порода-мост" является основной кровлей выработки, то вывал развивается до почвы "породы-моста";

и) при проходке выработок в условиях, характеризуемых критерием Ю. 3. Заславского, $Z_a^B \leq Z_a^K$, высота вывала зависит от способа проходки: при буровзрывном способе, высота вывалообразования равна толщине зоны пород, разрушенной взрывом за контуром горной выработки; при комбайновом способе проходки вывал не образуется.

Установлена закономерность вывалов пород кровли выработок, отличающаяся тем, что высота вывала h прямо пропорциональна произведению ширины вывала B на разность критериев Ю. 3. Заславского ΔZ_a

$$h = 2 \cdot B \cdot (Z_a^B - Z_a^K), \text{ м} \quad (3)$$

а вес пород зоны вывалообразования на крепь равен произведению объемного веса пород γ на отношение площади S к ширине основания зоны вывалообразования B

$$q = \gamma \cdot \frac{S}{B}, \text{ МПа}, \quad (4)$$

где S – площадь зоны вывалообразования

$$S = h \cdot (B - h \cdot ctg\alpha), \text{ м}^2.$$

Установлена закономерность реактивного отпора податливых крепей смещающим породам по данным натуральных измерений В.И. Стыцина на динамометрических станциях, смонтированных в выработках шахт Западного Донбасса.

Дополнительным анализом натуральных наблюдений установлено, что отпор арок податливых крепей смещающимся породам, увеличивается во времени неравномерно: имеют место активный и пассивный периоды нарастания отпора, который, в конечном счете, стремится к постоянной величине P_{max} .

$$P_{max} = \frac{250 \cdot B \cdot Z_a}{19 + 31 \cdot Z_a}, \text{ Т/М}^2. \quad (5)$$

Режим увеличения реактивного отпора со стороны свода крепи является нестационарным; отпор крепи в момент времени τ равен

$$P_\tau = \frac{P_{max} \cdot \tau}{\tau_y + \tau}, \text{ Т/М}^2. \quad (6)$$

Исследовано влияние упрочнения пород тампонажными растворами и анкерной крепью на несущую способность систем "породы-крепь".

Экспериментально установлены следующие факты (рис. 1):

а) применение последующего тампонажа стабилизирует смещение крепи КМП (рис. 1, кривая 1) на том уровне, которого они достигли и моменту упрочнения пород (рис. 1, кривая 2), определяемого по формуле

$$f_\tau = \frac{f_{max} \cdot \Delta\tau}{\frac{f_{max}}{v_o} + \Delta\tau}, \text{ М} \quad (7)$$

где $\Delta\tau$ - интервал календарного времени между началом проходки тампонируемого участка выработки τ_B и началом тампонажных работ τ_T ;

б) применение последующего тампонажа стабилизирует реактивный отпор свода крепи на уровне, достигнутом к моменту производства тампонажных работ, определяемого по формуле

$$P_\tau = \frac{P_{max} \cdot \Delta\tau}{\tau_y + \Delta\tau}, \text{ Т/М}^2, \quad (8)$$

где

$$\tau_y = \frac{1}{0,49 + 0,63 \cdot Z_a^B}, \text{ сут.};$$

в) при применении последующего тампонажа уменьшается смещение пород почвы. В зависимости от времени производства тампонажных работ, смещение пород почвы равно

$$f_T = 0,5 \cdot (f_{max} + f_T), \text{ м}, \quad (9)$$

где f_T – выпучивание пород за время $\Delta\tau_T$, м.

г) последующий тампонаж изменяет условия взаимодействия пород кровли и крепи путем трансформации сосредоточенной нагрузки на замок свода в равномерно распределенную по ширине свода, повышая несущую способность крепи в разы;

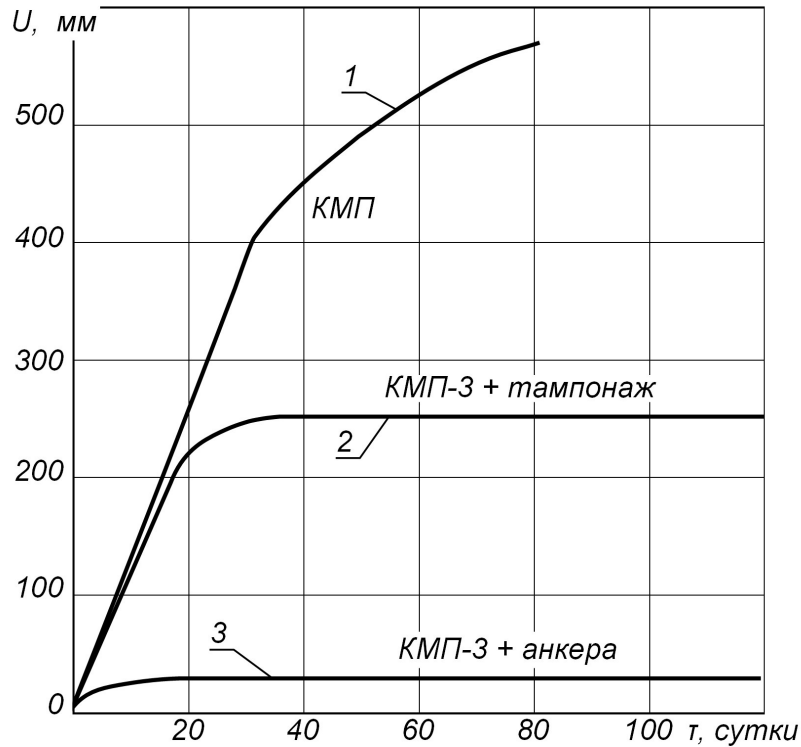


Рисунок 1 - Графики влияния способов охраны на выпучивание пород кровли выработках шахт Западного Донбасса

д) применение анкерной крепи (рис. 1, кривая 3) и последующего тампонажа существенно увеличивают сопротивление пород разрушению, характеризующегося коэффициентом условий работы породной подсистемы K_y , определяемого по формуле

$$K_y = \frac{Z_a^B}{Z_a^B - \frac{3 \cdot (U_p - U_y)}{L}} \quad (10)$$

где U_p и U_y – смещение пород кровли, соответственно, без упрочнения и с упрочнением [2].

Представление о влиянии упрочнения пород на коэффициент условий работы пород дает таблица 2, рассчитанная для условий экспериментов в панельном штреке гор. 265 м шахты "Днепровская", ГП "Павлоградуголь". Согласно расчетам и экспериментальным данным, установлено, что применение последующего тампонажа увеличивает коэффициент условий работы в 1,8 раза, а применение анкерной крепи - в 2,5 раза.

Таблица 2 - Влияние упрочнения пород на коэффициент условий работы пород в панельном штреке

Тип крепи	Способ охраны	Смещение	K_y
Арочная податливая	без охраны	300	1
	тампонажем	150	1,8
Арочная податливая с анкерами	без охраны	50	2,5

Для определения несущей способности упрочненных пород разработан полуэмпирический метод, основанный на теоретическом решении Ю.М. Либерманом задачи определения радиуса зоны неупругих деформаций, которое дополнено коэффициентом структурного ослабления пород (n) и искомой несущей способностью пород (R_y)

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot H - n \cdot \sigma_{сж}}{(2 + \beta_1) \cdot (R_y + P_k)} \right)^{\frac{1}{\beta_2}}. \quad (11)$$

Согласно эмпирическим закономерностям, установлена математическая модель безразмерной толщины зоны неупругих деформаций

$$\rho_3 = 1 + 3,1 \cdot \sqrt[3]{\left((Z_a^B - Z_a^K) \cdot \frac{\tau}{\tau_y + \tau} \right)^2}. \quad (12)$$

Приравняв правые части выражений (11) и (12), установлена закономерность изменения несущей способности пород зоны неупругих деформаций от основных влияющих факторов

$$R_y = \frac{2 \cdot \gamma \cdot H - n \cdot \sigma_{сж}}{(2 + \beta_1) \cdot \rho_3^{\beta_2}} - P_k, \text{ МПа}. \quad (13)$$

Расчетным анализом установлено, что несущая способность затампонированных пород достаточна для обеспечения устойчивости горных выработок, так как в разы превышает как отпор крепей, так и вес разрушенных пород кровли. Для определения несущей способности арочной крепи получена эмпирическая формула (14).

$$q = (T \cdot k_s \cdot k_{вн} \cdot k_{бн} + 0,7) \cdot k_{ж} \cdot k_{\phi}, \quad (14)$$

где T - тип СВП; k_s - коэффициент влияния поперечного сечения выработки, $k_s = 1,044 - 0,0235 \cdot S - 0,00008 \cdot S^2$; $k_{вн}$ - коэффициент влияния вертикальной нагрузки,

$$k_{\text{вн}} = \begin{cases} 1,0 & \text{– при распределенной нагрузке;} \\ 0,4 & \text{– при сосредоточенной нагрузке на площадке шириной 1,0 м;} \\ 0,25 & \text{– при точечной нагрузке в замке свода;} \end{cases}$$

$k_{\text{бн}}$ - коэффициент боковой нагрузки,

$$k_{\text{бн}} = \begin{cases} 1 & \text{– без боковой нагрузки;} \\ 1,25 & \text{– при перемещении стоек крепи породами почвы к оси выработки;} \end{cases}$$

$k_{\text{ж}}$ - коэффициент жесткости крепи,

$$k_{\text{ж}} = \begin{cases} 1,6 & \text{– для жесткого режима;} \\ 1,0 & \text{– для податливого режима;} \end{cases}$$

$k_{\text{ф}}$ - коэффициент формы арки,

$$k_{\text{ф}} = \begin{cases} 1,0 & \text{– арочная форма;} \\ 1,2 & \text{– шатровая форма.} \end{cases}$$

Формула (14) обеспечивает высокую точность расчетов. Отклонение от нормативной несущей способности составляет 1-2 %. Достоинство формулы (14) заключается в учете вида нагрузки, бокового давления и жесткости крепи, типа СВП, площади поперечного сечения и формы выработок, не подверженных влиянию очистных работ.

Согласно выполненным исследованиям, обоснованы параметры крепи КМП-3 (таблица 3) [3, 4].

Таблица 3 – Параметры арочной жесткой крепи (АЖ)

Площадь поперечного сечения, м ²	Параметры крепи	Критерий Ю. З. Заславского для пород кровли		
		до 0,25	0,25- 0,35	0,35- 0,45
до 10	Тип СВП	19	22	22
	Расстояние между рамами, м	1,0	0,8	0,5
более 10	Тип СВП	22	27	27
	Расстояние между рамами, м	0,8	0,8	0,5
Время отставания тампонажа, сут.		20-40	10-20	5-10

На основании выполненных исследований получены следующие результаты.

1. Установлены закономерности проявлений горного давления:

а) длина стрелы выпучиваемых пород кровли и почвы выработок и высота вывалов породы прямо пропорциональны произведению ширины выработки на разность критериев Ю. З. Заславского и соразмерны в соотношении 1:6;

б) реактивный отпор крепей и длина стрелы выпучивания увеличиваются по мере увеличения критерия Ю. З. Заславского и срока службы выработки, но в

затухающем режимі, і стабілізуються по величині, зависящій від часу виробництва тампонажних робіт;

2. Обоснованы параметри кріпелі виробіток: типи СВП, відстань між рамами, час отставання тампонажних робіт від проходчеських.

3. Разупрочнение анізотропних породних масивів навколо виробіток, закріплених податливою кріпеллю, відбувається в формі деструкцій пород: вигиби, розшарування, випучування, сколи, смяття, отримання, послаблюючих опору пород руйнуванню в рази.

4. Усилення анізотропних породних масивів навколо виробітки анкерами і/або тампонажем припиняє процеси деструкції, анізотропна породна середина трансформується в квазіізотропну, з самодостатньою несучою здатністю, забезпечуючою стійкість гірських виробіток без застосування традиційних кріпелі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. СНиП II-94-80 Підземні гірські виробітки. Руководство по проектуванню підземних гірських виробіток і розрахунок кріпелі / ВНИИМ, ВНИИОМШС. М.: Стройиздат: 1983 272 с.
2. Усаченко Б. М., А.В. Шмиголь, В.Я. Кириченко Охорона підготовчих виробіток глибоких горизонтів шахт Західного Донбасу. Обзор / ЦНИЭуголь. М.: 1992, 168 с.
3. Типовой проект НТР 2998-139. Сечения гірських виробіток для складних гірсько-геологічних умов шахт Західного Донбасу. М.: Центрогіпрошахт, 1973.
4. Sheiko, A.V. Geo-Mechanical bases of Planning of the kapital workings, erected in weakmetamorpleimining breeds // The scientific Method, 18/2018, p. 48-53.

REFERENCES

1. SNiP II-94-80. Podzemnye gornye vyrabotki. Rukovodstvo po proektirovaniu podzemnykh gornykh vyrabotok i raschetu krepri [SNiP II-94-80. Underground mine workings. Fasten guidance on planning of the underground mine workings and calculation of support] (1983), Stroizdat, Moscow, SU.
2. Usachenko B.M., Shmigol A.V. and Kirichenko V.Ya. (1982), Okhrana podgotovitelnykh vyrabotok gkubokikh gorizontov shakht Zapadnogo Donbassa. Obzor [Guard of the preparatory making of deep horizons of mines of Western Donbass. Review], TsNIEIUGol, Moscow, RU.
3. Tipovoi proekt NTR 2298-39. Secheniia gornykh vyrabotok dlia slozhnykh gorno-geologicheskikh uslovii shakht Zapadnogo Donbassa [Model project NTR 2998-139. Sections of the mine workings for the difficult mine-geological terms of mines of Western Donbass] (1973), Tsentrogiproshakht, Moscow, SU.
4. Sheiko, A.V. (2018), "Geo-Mechanical bases of Planning of the kapital workings, erected in weakmetamorpleimining rocks", The scientific Method, n0. 18, pp. 48-53.

Об авторе

Шейко Анатолій Васильевич, магістр, головний технолог в відділі проблем технології підземної розробки вугільних родовищ, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, igtmdp16@gmail.com

About the author

Sheiko Anatolii Vasyliiovych, Master of Science, Chief Technologist in Department of Underground Coal Mining, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine, (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, igtmdp16@gmail.com

Анотація. Для обґрунтування параметрів кріплень капітальних гірничих виробіток, що споруджуються у слабометаморфізованих породах, вивчено закономірності зміни параметрів різних сторін проявів гірничого тиску у гірничих виробітках. Для забезпечення стійкості виробіток, що споруджуються в слабометаморфізованих породах, застосовують металеві арочні і металобетонні кріплення зі зміцненням або без зміцнення порід. Проектні параметри кріплень обґрунтовують за нормативними методами, які є неприйнятними для умов слабометаморфізованих порід. Для обґрунтування параметрів кріплень виробіток, що споруджуються в слабометаморфізованих породах, вивчені закономірності прояву основних сторін гірського тиску: випинання порід покрівлі і ґрунту виробіток, обвали порід покрівлі, реактивний відсіч кріплення породам, що зміщуються, з урахуванням і без урахування зміцнення порід водоцементними розчинами і анкерами. Встановлено взаємозв'язки і пропорційності геомеханічних і технічних параметрів систем "порода-кріплення". На підставі

положень механіки суцільного середовища і встановлених дослідним шляхом закономірностей розроблений емпірико-аналітичний метод визначення несучої здатності зони непружних деформацій, з урахуванням і без урахування зміцнення породного контуру. Шляхом інжинірингових досліджень розроблена математична модель несучої здатності аروحної рами, що комплексно враховує тип спеціального виду профілю, площу поперечного перерізу виробки, жорсткість рами і вид навантаження на звід арки. Експериментально вивчено вплив часу посилення породного контуру на геомеханічні параметри систем "порода-кріплення" і вперше підтверджено теоретичний висновок про можливість забезпечення стійкості виробок шляхом використання несучої здатності зміцненого контуру, без використання традиційних кріплень як несучих конструкцій. Обґрунтовано навантаження на кріплення виробок, з урахуванням основних природних і технічних факторів. На підставі виконаних досліджень розроблені: типовий проект і технічні умови на податливі аручні і шатрові кріплення і спеціального шахтного профілю СВП, а також нові породні кріплення.

Ключові слова: геомеханіка, анкера, тампонаж, породобетон.

Annotation. For the ground of parameters of supports of the capital mine workings erected in slightly-metamorphized rocks, conformities to law of change of parameters of different parties of displays of mine pressure are studied in the mine workings. The metal arch and metal-concrete supports with or without hardening of rocks are used for providing stability of the workings constructed in weakly metamorphosed rocks. The support design parameters are justified by regulatory methods, which are unacceptable for the conditions of weakly metamorphosed rocks. In order to justify parameters of the working supports constructed in slightly metamorphosed rocks, regularities of the manifestation of the following main rock pressure features were studied: buckling of the roof and floor rocks, landslides of roof rocks, reactive resistance of supports to the shifting rocks, with and without consideration of the rock hardening with water-cement mortars and anchors. Interrelations and proportionalities of geomechanical and technical parameters of the rock-support systems were established. Based on the provisions of continuum mechanics and experimentally established patterns, an empirical-analytical method was developed for determining a bearing capacity of the zone of inelastic deformations, with and without hardening of the rock contour. Through the engineering research, a mathematical model of the arch frame bearing capacity was developed, which took into account a complex of the type of special profile, cross-sectional area of the working, rigidity of the frame and type of load on the arch. Influence of the time of the rock contour strengthening on geomechanical parameters of the rock support systems was experimentally studied, and it is for the first time when a theoretical conclusion about the possibility of ensuring stability of the workings by using the bearing capacity of the hardened contour without the use of traditional supports as supporting structures is confirmed. Loads on the working supports were validated with taking into account the key influencing natural and technical factors. On the basis of the research results, the following was developed: standard design and technical specifications for yielding arch and tent supports and special mine profiles SVP, as well as new rock supports.

Key words: geomechanics, anchor, grouting, rock concrete.

Стаття надійшла до редакції 16.02. 2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук К.К. Софійським