УДК 622.023.42:622.281.74

В. И. БОНДАРЕНКО, И. А. КОВАЛЕВСКАЯ, доктора техн. наук (Национальный горный университет)
А. В. ВИВЧАРЕНКО, канд. техн. наук (Минэнергоуголь Украины)
Р. Н. СВИСТУН, А. В. МАЛЫХИН, инженеры (Национальный горный университет)

Расчет параметров рамно-анкерной крепи выемочных выработок

Установлены закономерности управления состоянием крепежной системы выемочных выработок в зоне влияния очистных работ на базе регулирования процессов сдвижения заанкерованных приконтурных пород и нагружения рамно-анкерной крепи, положенных в основу инженерного метода расчета ее ресурсосберегающих параметров.

Ключевые слова: выемочная выработка, зона влияния очистных работ, рамно-анкерная крепь, сдвижения, нагружения, метод расчета.

Контактная информация: v_domna@yahoo.com

Актуальность проблемы поддержания выемочных выработок, в частности на шахтах Западного Донбасса, возрастает по ряду основных факторов:

- углевмещающая толща сложена слабыми слоистыми породами практически с отсутствием сцепления по поверхностям контактов литологических разностей, что существенно интенсифицирует проявления горного давления;
- разрабатываемые угольные пласты характеризуются повышенными прочностными свойствами по отношению к породам непосредственной кровли и подошвы угольного пласта, что обусловливает известную специфику формирования нагрузки на крепежную систему, выражающуюся в повышенном боковом давлении и пучении пород почвы, особенно в зоне опорного давления впереди очистного забоя;
- на большинстве шахт Западного Донбасса достигнуты достаточно высокие скорости подвигания очистных забоев, что, с одной стороны, требует повышенного внимания к эксплуатационному состоянию выемочных выработок, с другой – изыскания резервов сокращения затрат на их поддержание из-за возрастающих объемов проведения.

В этой связи для угольной промышленности Украины важна задача поддержания выемочных выработок за счет управления состоянием их крепежной системы в соответствии с характером проявлений горного давления в зоне влияния очистных работ при сохранении максимальной несущей способности на базе установленных закономерностей регулирования деформационно-силовых параметров ее элементов.

Опыт поддержания выемочных выработок на шахтах Западного Донбасса и результаты исследований определили приоритетное, по мнению авторов, направление – использование рамно-анкерной крепи с пространственно-податливыми связями как крепежной системы, наиболее полно адаптирующейся к характеру проявлений горного давления, изменяющегося по мере приближения очистного забоя. В понятие «адаптация» вложен смысл высоких потенциальных возможностей конструкции по регулированию сопротивления в соответствии с меняющейся горно-геологической ситуацией в окрестности выемочных выработок с одновременным приближением к состоянию равнопрочности грузонесущих элементов, что тождественно достижению максимальной несущей способности при неизменных затратах либо экономии ресурсов при сохранении несущей способности на прежнем уровне. Поэтому основная цель исследований – раскрытие этих потенциальных возможностей на базе установленного комплекса закономерностей взаимодействия элементов рамно-анкерной крепи между собой и со вмещающим породным массивом.

Вследствие анализа существующих подходов к расчету параметров крепежных систем выемочных выработок, поддерживаемых, в том числе, в зоне активного влияния очистных работ, предпочтение отдано нормативной методике, приведенной в СОУ 10.1.00185790.011:2007 [1], для которой характерны надежность прогнозируемых результатов, с одной стороны, и удобство для последующих расчетов внутренних усилий в рамной крепи в совокупности с критериями оптимизации ее НДС, с другой. Ее существенный недостаток в том, что

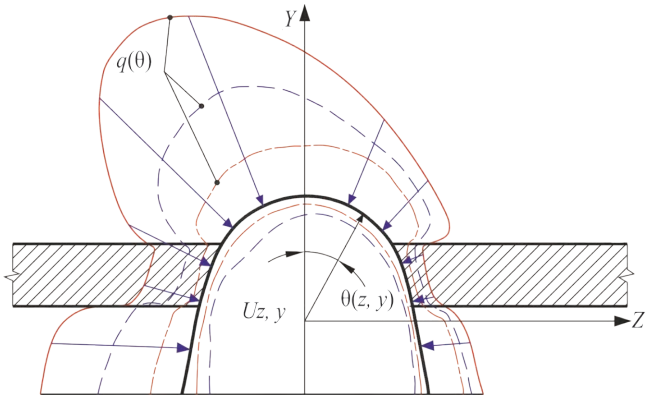

Рис. 1. Схема развития проявлений горного давления по контуру θ(*z, y*) выемочной выработки в процессе приближения очистного забоя: *Uz, y* – перемещение контура; -·-·- – в начале зоны опорного давления; - - - – посередине участка опорного давления; ---- – перед очистным забоем.

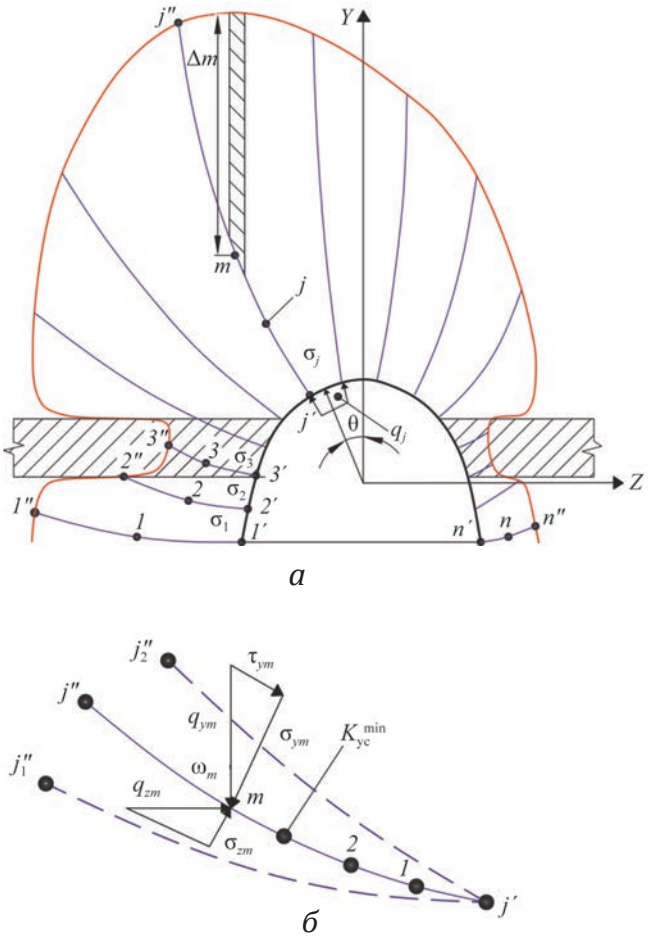

Рис. 2. Схемы к определению эпюры нагрузки $q(\theta)$ на крепежную систему (*а*) и выбору линии скольжения с минимальным коэффициентом $K_{ус}^{min}$ устойчивости (*б*): *1, 1', 1''*; *2, 2', 2''*; *3, 3', 3''* – характерные точки линий скольжения.

не учтены объективно наблюдаемые более активные проявления горного давления со стороны рабочего борта выемочной выработки при приближении очистного забоя (рис. 1), который выражается в формировании асимметричной нагрузки $q(\theta)$ на рамно-анкерную крепь.

Прогноз асимметричного нагружения крепи выполнен путем определения размеров области разупрочнения приконтурных пород с учетом зоны опорного давления впереди приближающейся лавы и базируется на таких положениях:

высота свода пород предельного равновесия возрастает с приближением очистного забоя и определяется по стандарту [1];

в боках выработки ширина области разупрочнения прямо пропорциональна расстоянию, на которое переместился контур выработки с преимущественным развитием со стороны рабочего борта;

площадь свода предельного равновесия в кровле остается неизменной (по отношению к нормативной методике [1]), но сам свод вытянут в сторону отрабатываемого выемочного участка. При этом выполнена дифференциация ширины области разупрочнения более крепкого угля и менее крепких пород непосредственной кровли и почвы, характерных для условий Западного Донбасса.

Указанные положения позволили получить компактные выражения по описанию контура области предельного равновесия пород:

- радиус свода выработки (в полярных координатах) аппроксимируется тремя членами тригонометрического ряда

$$r_{св}(\theta)=a_1\sin\theta+a_2\cos\theta\pm a_3\sin(\theta+\theta_{max}), \qquad (1)$$

коэффициенты a_1, a_2, a_3 которого связаны простыми соотношениями с названными авторами «базовыми» точками контура, определяемыми по нормативной методике, приведенной в СОУ [1]; угловая координата θ_{max} расположения максимума высоты свода изменяется в ограниченном диапазоне от 18,5 до 20° (установлено по результатам вычислительного анализа) и принята постоянной (θ_{max}= 20°);

- ширина области предельного равновесия пород для рабочего $в_2^р$ и нерабочего $в_2^н$ бортов выемочной выработки рассчитывается по выражениям

$$в_2^р=U_2^б(2K_1-K_2)/(2K_1K_2);\ в_2^н=U_2^б/(2K_1), \qquad (2)$$

где $U_2^б$ – сближение боков выработки в зоне опорного давления;

K_1 и K_2 – эмпирические коэффициенты для участков выработки вне зоны влияния очистных работ

и в зоне опорного давления; все параметры определяют по методике, приведенной в СОУ [1];

- ширину разупрочнения угля, пород непосредственной кровли и почвы угольного пласта дифференцируют с помощью расчетных выражений $U_2^б$ с соответствующими сопротивлениями сжатию указанных литологических разностей.

Решение задачи по определению области неустойчивых пород в зоне влияния очистных работ реализовано на базе классического метода статики сыпучей среды с использованием разработок [2, 3] по установлению коэффициента устойчивости призм скольжения внутри области разупрочнения и расчету нагрузки q_j по j-му участку контура выработки из условия предельного равновесия j-й призмы сползания

$$\left(M_{уд}+M_{q_j}\right)/M_{сд}=1, \qquad (3)$$

где $M_{уд}$ и $M_{сд}$ – моменты от действия удерживающих и сдвигающих усилий по j-му участку контура;
M_{q_j} – момент от действия минимально достаточной реакции q_j крепежной системы.

Алгоритм расчетов пояснен схемами на рис. 2 (где Δm и m – длина и ширина выделенного элементарного объема), на которых отражено семейство произвольных линий скольжения. Контур выработки разбивается на конечное количество участков δ_j, крайние точки j' которых служат началом линий скольжения, простирающихся до границы области предельного равновесия, разбитой на сегменты, степень устойчивости которых обусловливает нагрузку на крепежную систему в соответствии с условием (1). Положение j-й линии скольжения из возможных вариантов (например, от точки j' до точек j'', j_1'', j_2'' на рис. 2, *б*) выбрано по критерию минимального коэффициента устойчивости $K_{ус}^{min}$. Этой линии скольжения соответствует максимальная нагрузка q_j на участке δ_j (где σ_{ym}, σ_{zm}, τ_{ym} – компоненты напряжений). Обобщение кусочно-линейной нагрузки q_j по контуру выработки в виде эпюры $q(\theta)$ осуществлено с помощью тригонометрического ряда $q(\theta)=q_в\cos\theta+q_б\sin\theta\pm k\sin2(\theta+\psi)$.

В соответствии с разработанной методикой проведен комплекс расчетов по определению составляющих нагрузки на крепежную систему (рис. 3), которая включает: вертикальную нагрузку в замке свода $q_в$; боковую нагрузку со стороны нерабочего борта выработки по контактам подрывки кровли и почвы $q_б$; показатель асимметрии нагрузки в кровле выработки K; боковую нагрузку со стороны угольного пласта в нерабочем борту выработки $(q_б)_1$; боковую нагрузку со стороны угольного пласта в рабочем борту выработки $(q_б)_2$; боковую нагрузку по глубине подрывки непосредственной почвы со стороны рабочего борта выработки $(q_б)_3$.

Для перечисленных параметров нагружения рамно-анкерной крепи с использованием методов корреляционно-дисперсионного анализа результатов расчетов получены уравнения регрессии:

$$\left.\begin{aligned}
&q_в=18{,}5h_2(0{,}25+0{,}15B)(1-0{,}4\mathrm{tg}\varphi);\\
&q_б=156h_2^{0{,}42}(0{,}83-0{,}016\varphi)\left[1-\exp(-0{,}3h_б)\right];\\
&K=12{,}8h_2^{0{,}85}(1-0{,}76\mathrm{tg}\varphi)(0{,}25+0{,}15B)^{-1};\\
&(q_б)_1=11{,}2h_2^{0{,}6}(1{,}05-0{,}02\varphi_у)(0{,}8+0{,}55m_у);\\
&(q_б)_2=13{,}6\left(1{,}2+h_2^{0{,}8}\right)(1{,}1-0{,}018\varphi_у)(0{,}85+0{,}4m_у);\\
&(q_б)_3=36{,}5h_б^{0{,}9}\left(2{,}3+h_2^{0{,}7}\right)(0{,}75-0{,}012\varphi),
\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где h_2 – высота свода предельного равновесия в зоне опорного давления, м, определяется по стандарту [1];
B – ширина выработки в проходке, м;
φ и $\varphi_у$ – углы внутреннего трения вмещающих пород и угольного пласта;
$h_б$ – глубина подрывки почвы пласта, м;
$m_у$ – мощность угольного пласта, м.

Система выражений (4) – основа для решения задачи по определению внутренних усилий в рамной крепи с учетом реакции анкеров через пространственно-податливые связи. Для вычисления параметров использовали известную аппроксимацию (незамкнутую круглоцилиндрическую) реальной формы наиболее применяемых крепей серий КШПУ и КМП-А3, обоснованную в работах [2, 3], которая обладает вполне допустимой погрешностью и позволяет выполнить последующую оптимизацию внутренних усилий в раме аналитическими методами строительной механики. При построении

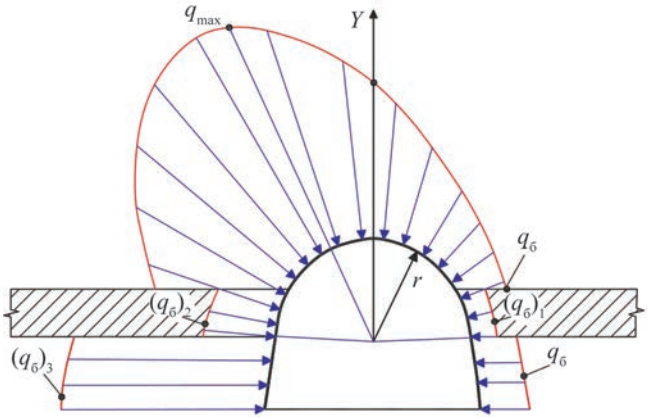

Рис. 3. Схема нагружения крепежной системы в зоне повышенного горного давления впереди лавы.

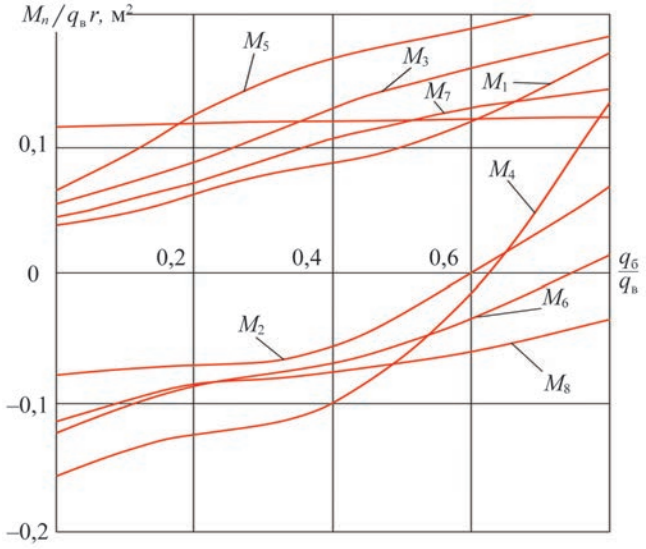

Рис. 4. Связь максимумов изгибающего момента в рамной крепи с параметром $q_б/q_в$.

расчетной схемы рамно-анкерной крепи также использованы результаты исследований [4] по обоснованию наиболее эффективного конструктивного решения (при противодействии повышенным боковым нагрузкам) – установки по два боковых анкера со стороны рабочего и нерабочего бортов выработки и их механические связи со стойками

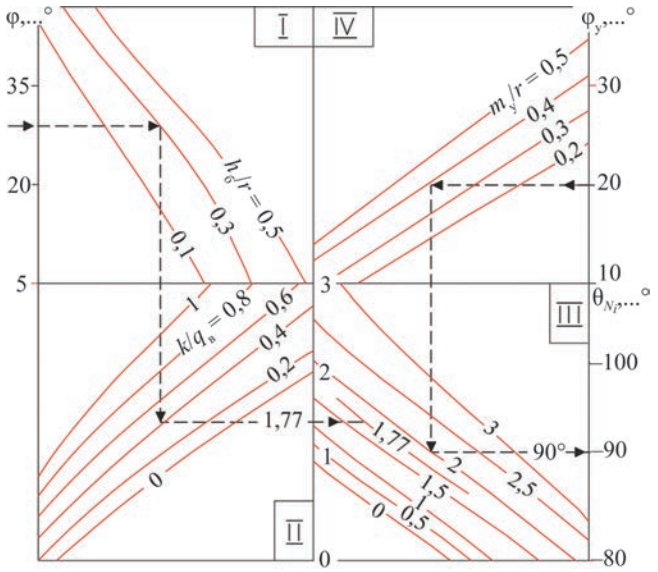

Рис. 5. Номограмма для расчета требуемой координаты установки нижнего анкера со стороны нерабочего борта выработки: I, II, III, IV – квадранты в номограмме; k – показатель асимметрии кровли выработки; φ и φ_y – углы трения вмещающих пород и угольного пласта.

рамы пространственно-подаливыми узлами в единую грузонесущую конструкцию.

В процессе многовариантных расчетов рассматриваемой рамно-анкерной крепи методами строительной механики выявлено девять участков ее контура, где возможно появление максимумов изгибающего момента $M_n (n = 1, ..., 9)$. Для определения каждого из них составлена система уравнений, численный анализ которой позволил установить закономерности связи каждого максимума M_n со всеми составляющими нагрузки по формулам (4) и параметрами установки боковых анкеров: реакцией воздействия i-го анкера ($i = 1, ..., 4$) на раму N_i; угловой координатой размещения анкера (по ней определяется высота установки анкера y_i от подошвы выработки) θ_{N_i}. Фрагменты этих закономерностей для относительных значений $M_n/(q_в r)$ максимумов изгибающего момента ($r = 0,5\ B$) приведены на рис. 4.

Выявление полного набора закономерностей связи максимумов изгибающего момента в любой точке контура рамы с параметрами нагружения крепежной системы и установки боковых анкеров позволило минимизировать M_n на основе существующих принципов оптимизации параметров рамно-анкерной крепи [3]. Снижение максимумов M_n тождественно повышению несущей способности рамно-анкерной крепи при неизменных параметрах либо сокращению металлоемкости при сохранении на постоянном уровне несущей способности. Оба направления отвечают стратегии ресурсосбережения при поддержании выемочных выработок. В результате получены закономерности связи рациональных параметров θ_{N_i} и N_i установки боковых анкеров с размерами выработки и эпюрой нагрузки на крепежную систему. Эти закономерности доведены до уровня оперативного практического использования путем построения комплекса расчетных номограмм, одна из которых в качестве примера приведена на рис. 5.

Для реализации условий ресурсосберегающего поддержания выемочных выработок путем регулирования режима работы боковых анкеров сформулированы требования [5] и выбрана наиболее эффективная конструкция податливого анкера с распорным эластичным замком, работающего практически в режиме постоянного и регулируемого сопротивления [6].

Усовершенствован метод расчета параметров анкера постоянного сопротивления, который выполняется по заданной реакции N_i сопротивления анкера и охватывает его конструктивные элементы. В качестве технологического параметра рассчи-

тывают регулируемый момент распора $M_р$ эластичного замка анкера, соответствующий требуемой реакции N_i анкера:

$$M_р(N_i)=\frac{(M_р)_{max}}{\Phi\sigma_{сж}}N_i, \qquad (5)$$

где $(M_р)_{max}=(в^2-a^2)\sigma_{сж}\{d_1[t/(d_1+2a)+1{,}81 f_1]\times$

$\times[1-0{,}73\, t f_1/(d_1+2a)]^{-1}+(a+в)f_1\}$;

$\Phi=7{,}35\, d_ш f_{тр}\sqrt{(E_п/G)\ (d_ш^2-d_1^2)}\times$

$\times\left\{1-\exp\left[-0{,}094 l_1\sqrt{G/[E_п(d_ш^2-d_1^2)]}\right]\right\}$;

$l_1=0{,}25\, l\{8-[(d_ш^2-d_1^2)/(в^2-a^2)]\}$;

$\sigma_{сж}$ – сопротивление породных стенок шпура одноосному сжатию;

в и *a* – наружный и внутренний радиусы эластичных втулок;

$d_ш$ и d_1 – диаметр шпура и несущего стержня анкера;

t и f_1 – шаг резьбового соединения и коэффициент трения в нем;

$f_{тр}$ – коэффициент трения материала эластичного замка по породе;

l – длина эластичного замка;

$E_п$ и G – модули деформации породы и сдвига материала эластичного замка.

В итоге получена зависимость для управления режимом работы анкеров посредством регулирования крутящего момента в процессе их установки и эксплуатации.

Выводы. Образование области предельного состояния приконтурных пород характеризуется не только асимметрией формы, но и резкими изменениями координат границы области как наиболее адекватно отвечающей реальным геомеханическим процессам в зоне опорного давления впереди очистного забоя. Без нарушения принципов руководящих нормативных документов по прогнозированию проявлений горного давления учтено дифференцированное разупрочнение близлежащих пород (по контуру выработки), которое отражено в разработанном методе расчета размеров области предельного равновесия вокруг выемочной выработки в зоне опорного давления.

Комплекс многовариантных расчетов по определению параметров эпюры нагружения рамно-анкерной крепи акцентирует внимание на следующих результатах:

доказано формирование существенно асимметричной нагрузки на крепежную систему не только в кровле, но и в боках выработки, что обусловливает существенное снижение несущей способности традиционных конструкций рамных податливых крепей (в основном серий КШПУ и КМП-А3), наиболее широко применяемых для поддержания выемочных выработок;

если в кровле асимметричная составляющая нагрузки достигает 35 – 50 % вертикальной нагрузки в замке свода, то в боках выработки нагрузка со стороны ее рабочего борта в 2 – 3 раза и более превышает таковую со стороны нерабочего борта; такая асимметрия нагружения требует принятия мер по усилению крепежной системы со стороны приближающегося очистного забоя;

боковая нагрузка со стороны рабочего борта выработки нередко превышает вертикальную нагрузку в замке ее свода; такая эпюра нагружения не соответствует конструктивным особенностям рамных податливых крепей, слабо сопротивляющихся боковым нагрузкам и нуждающимся в усилении в боковом направлении;

для аргументированного выбора параметров средств усиления крепежной системы получены зависимости связи составляющих нагрузки по всему контуру крепи с геомеханическими и горнотехническими характеристиками поддержания выемочной выработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Підготовчі* виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони: СОУ 10.1.00185790.011:2007. – К.: Мінвуглепром України, 2007. – 113 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України. Стандарт).

2. *Симанович Г. А.* Управление режимами взаимодействия породного массива с крепью горных выработок на основе регулирования ее деформационно-силовой характеристикой: дис. ... доктора техн. наук: 05.15.04 / Г. А. Симанович. – Днепропетровск, 1993. – 408 с.

3. *Ковалевская И. А.* Геомеханика управления устойчивостью пространственной системы «массив – упрочненные породы – крепь подземных выработок»: дис. ... доктора техн. наук: 05.15.02 / И. А. Ковалевская. – Днепропетровск, 2004. – 349 с.

4. *Ковалевская И. А.* Взаимодействие анкерной и комбинированной крепей с породным массивом и разработка метода расчета их рациональных параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11 / И. А. Ковалевская. – Днепропетровск, 1995. – 200 с.

5. *Бондаренко В. И.* Повышение устойчивости выемочных выработок в слоистом массиве слабых пород / [В. И. Бондаренко, И. А. Ковалевская, А. В. Вивчаренко и др.] // Уголь Украины. – 2014. – № 2. – С. 8–11.

6. *Бондаренко В. И.* Новая конструкция анкерной крепи, работающая при постоянном сопротивлении / В. И. Бондаренко, И. А. Ковалевская, Г. А. Симанович // Уголь Украины. – 1997. – № 8. – С. 10–12.