

УДК 622.241.8:532.546

**ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ
НАЧАЛЬНОМ ГРАДИЕНТЕ ДАВЛЕНИЯ**

Эседулаев Р.

*Доктор технических наук, старший специалист кафедры химии и геологии
Академия Наук Туркменистана,
Ашхабад, Туркменистан*

Джумаев Б.

*Заместитель председателя
Государственный концерн «Туркменнебит»,
Ашхабад, Туркменистан*

Гадамов Д.

*Доктор химических наук, академик-секретарь, заведующий кафедры физики и
математики, химии, геологии, технических наук Академии Наук
Туркменистана, исполняющий обязанности директора
Международный научно-технологический парк Академии Наук Туркменистана,
Ашхабад, Туркменистан*

Сапармырадов А.

*Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
автоматизированных систем управления
Военный институт им. Великого Сапармырата Туркменбаши Министерства
Обороны Туркменистана,
Ашхабад, Туркменистан*

Эседуллаева О.

*Кандидат технических наук, исполняющая обязанности заведующей
Лабораторией разработки газовых месторождений Юго-Восточного
Туркменистана, Отдела разработки нефтегазоконденсатных
месторождений,
Научно-исследовательский институт природного газа Государственного
концерна «Туркменгаз»,
Ашхабад, Туркменистан*

Гурбангельдиев Б.

*Старший научный сотрудник, Лаборатория технологий альтернативных
источников энергии и измерительных приборов
Международный научно-технологический парк Академии Наук Туркменистана,
Ашхабад, Туркменистан*

Аннотация

Построена и сопоставлена математическая модель распространения бурового раствора в продуктивном пласте при плоскорадиальной фильтрации. Движение границы раздела описывается задачей Стефана для двух пьезопроводных областей, а для инженерной оценки рассмотрен метод последовательной смены стационарных состояний. Показано, как начальный градиент давления, перепад давления, вязкость и упругие свойства среды входят в безразмерные параметры задачи. Сформулированы условия применимости приближённой модели и критерий контроля численного решения.

Ключевые слова: буровой раствор, поглощение, плоскорадиальная фильтрация, задача Стефана, подвижная граница, начальный градиент давления, пьезопроводность.

PLANAR-RADIAL DRILLING FLUID LOSS WITH AN INITIAL PRESSURE GRADIENT

Esedulaev R.

Doctor of Technical Sciences, Senior Specialist, Department of Chemistry and Geology, Academy of Sciences of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan

Dzhumayev B.

Deputy Chairman, State Concern "Turkmennebit", Ashgabat, Turkmenistan

Gadamov D.

Doctor of Chemical Sciences, Academician-Secretary, Head of the Department of Physics, Mathematics, Chemistry, Geology, and Technical Sciences, Academy of Sciences of Turkmenistan; Acting Director, International Scientific and Technological Park of the Academy of Sciences of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan

Saparmyradov A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Automated Control Systems, Military Institute named after... Ministry of Defense of Turkmenistan (named after the Great Saparmurat Turkmenbashi), Ashgabat, Turkmenistan

Esedullayeva O.

*Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Laboratory for Gas Field Development in Southeastern Turkmenistan (Department of Oil, Gas, and Condensate Field Development),
Natural Gas Research Institute of the State Concern "Turkmengaz",
Ashgabat, Turkmenistan*

Gurbangeldiyev B.

*Senior Researcher, Laboratory of Alternative Energy Technologies and Measuring Instruments,
International Scientific and Technology Park of the Academy of Sciences of Turkmenistan,
Ashgabat, Turkmenistan*

Abstract

A mathematical model describing the propagation of drilling fluid into a productive formation under conditions of plane-radial filtration has been constructed and analyzed. The movement of the interface is described by a Stefan problem involving two piezoconductive regions, while a method of successive steady states is considered for engineering assessment purposes. The study demonstrates how the initial pressure gradient, pressure drop, viscosity, and elastic properties of the medium are incorporated into the dimensionless parameters of the problem. Conditions for the applicability of the approximate model and a criterion for verifying the numerical solution are formulated.

Keywords: drilling fluid, fluid loss, plane-radial filtration, Stefan problem, moving boundary, initial pressure gradient, piezoconductivity.

Введение

Поглощение бурового раствора продуктивным пластом возникает при превышении забойным давлением давления, поддерживаемого пластом. Опасность процесса определяется не только потерей раствора, но и радиусом зоны, в которую он проникает: чрезмерное распространение изменяет фильтрационные свойства коллектора и затрудняет дальнейшее управление давлением. Поэтому расчёт должен связывать параметры раствора с движением фронта поглощения, а не ограничиваться оценкой мгновенного расхода.

В плоскорадиальной постановке скважина рассматривается как цилиндрический источник. Внутри движущегося фронта находится закачанный раствор, снаружи — пластовая жидкость или газ. Сжимаемость фаз и пористой среды приводит к нестационарному распределению давления; неизвестный радиус фронта делает задачу свободнограничной. Цель работы — привести эту постановку к компактной форме, показать численный алгоритм согласования давлений на фронте и сопоставить его с квазистационарной моделью.

Постановка плоскорадиальной задачи

Пусть r_0 — эффективный радиус скважины, а $R(t)$ — радиус проникновения раствора. В области $r_0 \leq r \leq R(t)$ давление обозначается через $P_1(r, t)$, а в области $R(t) \leq r \leq \infty$ — через $P_2(r, t)$. Коэффициенты пьезопроводности зон учитывают проницаемость, вязкость, пористость и сжимаемость:

$$a_i = \frac{k_i K_i}{\mu_i (m_i + K_i / K_c)}, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

Тогда перенос давления в каждой зоне описывается радиальным уравнением диффузии:

$$a_1 \left(\frac{\partial^2 P_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_1}{\partial r} \right) = \frac{\partial P_1}{\partial t}, \quad r_0 \leq r \leq R(t), \quad (2)$$

$$a_2 \left(\frac{\partial^2 P_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_2}{\partial r} \right) = \frac{\partial P_2}{\partial t}, \quad R(t) \leq r \leq \infty, \quad (3)$$

Начальное состояние пласта принимается равномерным, на стенке скважины задаётся давление нагнетания, а на бесконечности сохраняется пластовое давление. На подвижном фронте непрерывность давления дополняется балансом фильтрационных потоков и законом движения границы:

$$\begin{aligned} P_2(r, 0) = P_0, \quad P_1(r_0, t) = P_c, \quad P_2(\infty, t) = P_0, \quad P_1(R, t) = P_2(R, t) \quad (4) \\ \frac{k_1}{m_1 \mu_1} \frac{\partial P_1(R, t)}{\partial r} = \frac{k_2}{m_2 \mu_2} \frac{\partial P_2(R, t)}{\partial r}, \quad \frac{dR}{dt} = - \frac{k_1}{m_1 \mu_1} \frac{\partial P_1(R, t)}{\partial r} + \frac{k_2}{m_2 \mu_2} \frac{\partial P_2(R, t)}{\partial r} \quad (5) \end{aligned}$$

Именно неизвестность функции $R(t)$ отличает задачу от обычной краевой задачи фильтрации. Для устойчивого численного решения фронт фиксируется заменой координаты $x = (r - r_0) / (R - r_0)$, после чего расчёт ведётся на отрезке $0 \leq x \leq 1$ и внешней полубесконечной области. В безразмерных переменных $\tau = t / T^*$, $\xi = R / r_0$, $T^* = r_0^2 / x_1$, условие равенства давлений на фронте становится дополнительным нелинейным условием.

Безразмерные параметры и численный алгоритм

Таблица 1 - Безразмерные комплексы и их физический смысл

Комплекс	Определение	Интерпретация
$\alpha_1 = \Delta p / (\gamma r_c)$	отношение перепада давления к начальному градиенту	предельный масштаб фронта
$\alpha_2 = \Delta p / p_k$	относительный перепад давления	степень возмущения газа
$\alpha_3 = x_1 / x_2$	отношение пьезопроводностей	контраст зон фильтрации
$\alpha_4 = \Delta p \beta^* / m_1$	упругоёмкость системы	влияние сжимаемости

Введённая координата устраняет переменную границу, но переносит её влияние в коэффициенты уравнений и граничные условия. На каждом шаге времени неизвестной величиной удобно считать скорость фронта

$\eta_{n+1} = \xi'(\tau_{n+1})$. При заданном пробном значении η решаются две задачи для давлений, после чего вычисляется невязка сопряжения:

$$\phi(\eta) \equiv U_1^{(\eta)}(1, \tau_{n+1}) - U_2^{(\eta)}(1, \tau_{n+1}) = 0, \quad \tau > 0. \quad (6)$$

Корень находится итерацией Ньютона. Производная невязки аппроксимируется симметричной разностью с малым приращением $\Delta\eta$:

$$\eta^{(s+1)} = \eta^{(s)} - \Delta\eta \cdot \frac{\phi(\eta^{(s)} + \Delta\eta) + \phi(\eta^{(s)} - \Delta\eta)}{\phi(\eta^{(s)} + \Delta\eta) - \phi(\eta^{(s)} - \Delta\eta)}. \quad (7)$$

Итерации прекращаются при $|\eta^{(s+1)} - \eta^{(s)}| < \varepsilon_\eta$. Дополнительно проверяется физическое ограничение на положение фронта:

$$1 < \xi_\eta(\tau) < 1 + \frac{\Delta p}{\gamma r_c}, \quad \Delta p = P_c - P_0 \quad (8)$$

Если ограничение нарушается, временной шаг уменьшается и расчёт повторяется. Такая проверка важнее формального достижения невязки, поскольку быстрый рост фронта может быть численно приемлемым, но физически несовместимым с заданным начальным градиентом.

Квазистационарная модель и сопоставление

Для инженерной оценки можно считать, что в каждый момент времени поле давления успевает принять стационарный вид при текущем положении фронта. При поршневом движении раствора и постоянном давлении газа это приводит к обыкновенному уравнению для радиуса проникновения:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{k_1}{m_1 \mu_1} \cdot \frac{\Delta p - \gamma(r_c - R)}{R \cdot \ln\left(\frac{R}{r_c}\right)}$$

Введём $\tau' = tk_1\gamma^2/(m_1\mu_1\Delta p)$ и $\xi' = (R - r_c)\gamma/\Delta p$. Тогда модель приобретает универсальный вид:

$$\frac{d\xi'}{d\tau'} = \alpha_1 \cdot \frac{1 - \xi'}{(1 + \alpha_1\xi') \cdot \ln(1 + \alpha_1\xi')}, \quad \alpha_1 = \frac{\Delta p}{\gamma r_c}, \quad \xi'(0) = 0. \quad (9)$$

При $\tau' \rightarrow \infty$ нормированная координата стремится к единице. Это означает, что начальный градиент ограничивает предельное расстояние проникновения, тогда как перепад давления задаёт скорость приближения к нему. Модель проста для параметрического анализа, но не воспроизводит нестационарное перераспределение давления так полно, как задача Стефана.

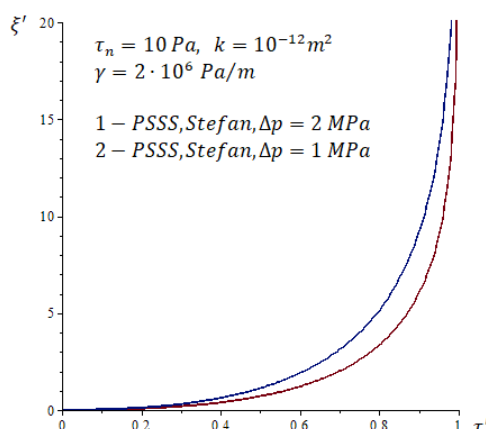
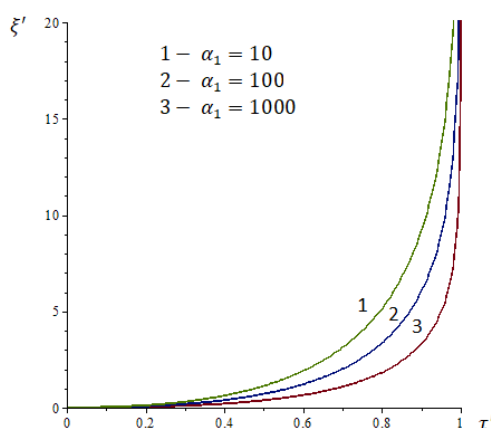


Рис. 1 - Сравнение решения задачи Стефана и решения, полученное методом последовательной смены стационарных состояний. (Источник: разработано автором)

Рис. 2 - Решения, полученные при различных α_1 методом последовательной смены стационарных состояний. (Источник: разработано автором)

На рис. 1 сопоставляются два описания одного процесса при одинаковом масштабе времени. Совпадение кривых на начальном участке подтверждает корректность квазистационарной оценки для медленного продвижения фронта. Расхождение усиливается при приближении к предельному радиусу, когда влияние сжимаемости и нестационарного поля давления становится существенным. Рис. 2 показывает, что увеличение α_1 смещает быстрый участок кривой к большим значениям безразмерного времени; следовательно,



большой начальный градиент уменьшает допустимый радиус поглощения при прочих равных условиях.

Альтернативное самоподобное решение

Второй подход рассматривает фронт как границу поршневого вытеснения и ищет самоподобный режим $R^2/t = \alpha$. В отличие от пошагового решения задачи Стефана здесь сначала строятся аналитические профили давления, а затем из кинематического условия определяется единственный параметр скорости α . Для двух зон вводятся переменные $\xi_i = r/(2\sqrt{a_i t})$, и решение имеет вид:

$$P_1 = A_1 Ei(-\xi_1^2) + B_1, \quad P_2 = A_2 Ei(-\xi_2^2) + B_2, \quad \frac{R^2(t)}{t} = \alpha. \quad (10)$$

Постоянные определяются из давления на стенке скважины, условия на бесконечности и сопряжения на границе. Для малых аргументов используется разложение интегральной показательной функции, поэтому давление во внутренней зоне содержит логарифмический член $\ln(R/r_c)$. В результате расход можно записать в форме, удобной для анализа параметров:

$$Q \simeq \frac{\pi h \cdot \alpha}{\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2}} - \frac{k_1 \pi h}{\mu_1} \cdot \gamma r_c \quad (11)$$

Для сопоставления результатов удобно использовать комплексы $C_1 = \alpha_1/\alpha_3$ и $C_2(\alpha)$, включающие перепад давления, начальный градиент, вязкость и отношение пьезопроводностей. При увеличении C_1 скорость фронта уменьшается; тем самым безразмерная форма позволяет выбирать параметры раствора до проведения полного нестационарного расчёта.

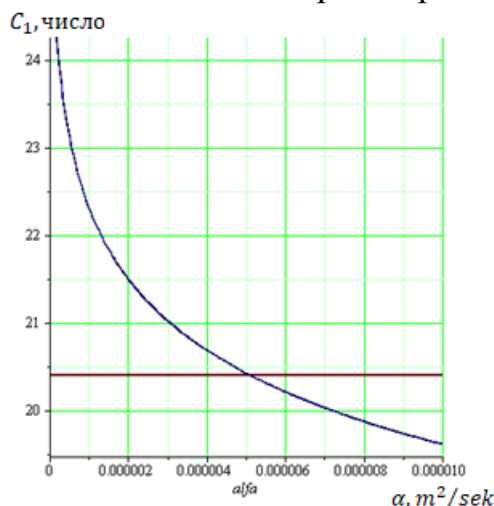


Рис. 3 - График функции $C_1(\alpha)$ в зависимости от скорости поглощения бурового раствора. (Источник: разработано автором)

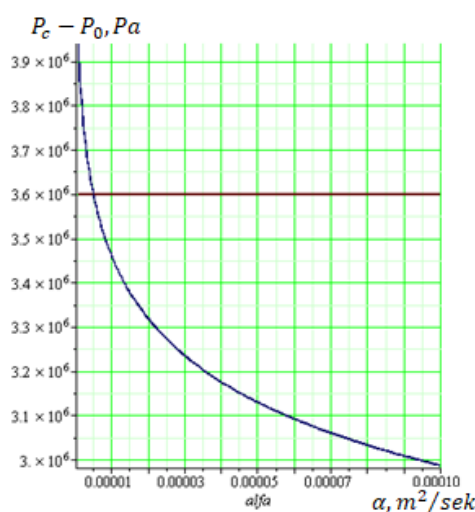


Рис. 4 - График зависимости разности давления от скорости поглощения бурового раствора. (Источник: разработано автором)

Самоподобное решение не заменяет задачу Стефана во всех режимах. Оно предполагает, что форма профиля давления сохраняется при движении фронта, и поэтому особенно полезно для оценки установившейся тенденции. Его преимущество — прозрачная зависимость результата от регулируемых параметров; ограничение — необходимость отдельно проверять, не нарушены ли начальные и переходные условия.

Обсуждение результатов

Плоскорадиальная модель выделяет три взаимосвязанных механизма. Во-первых, геометрический множитель $1/r$ снижает градиент давления по мере удаления от скважины, поэтому радиус фронта растёт не линейно. Во-вторых, вязкость раствора уменьшает фильтрационный поток и замедляет перенос давления. В-третьих, начальный градиент создаёт дополнительный сопротивляющий фактор: повышение γ уменьшает разность давлений, доступную для дальнейшего продвижения фронта.

Практически параметры следует выбирать не по одному показателю. Увеличение вязкости может снизить потери раствора, но одновременно ухудшить гидравлическое управление и увеличить требуемое давление нагнетания. Поэтому безразмерные комплексы удобны как средство совместной настройки: сначала задаётся допустимый радиус поглощения, затем подбираются сочетания μ_1 , γ и Δp , обеспечивающие этот радиус при заданной пьезопроводности пласта.

Выводы

Сформулирована плоскорадиальная задача распространения бурового раствора с подвижной границей и начальным градиентом давления. Задача Стефана учитывает нестационарное давление в обеих зонах и решается через итерационное согласование давления на фронте. Квазистационарная модель сводит расчёт к одному обыкновенному уравнению и пригодна для быстрых оценок.

Сопоставление показывает, что приближённый метод может использоваться для предварительного подбора параметров, а окончательная оценка допустимого радиуса должна опираться на свободнограничную постановку. Наиболее прямой способ уменьшить расстояние поглощения — увеличить сопротивление фильтрации раствора и начальный градиент при сохранении технологически допустимого перепада давления.

Библиографический список

1. Басарыгин Ю.М., Будников В.Ф., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Технологические основы освоения и глушения нефтяных и газовых скважин. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. — 543 с.
2. Басниев К.С. Подземная гидравлика. — М.: Недра, 1986. — 303 с.
3. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. — М.: Недра, 1972. — 288 с.
4. Булатов А.И., Макаренко П.П., Проселков Ю.М. Буровые промывочные и тампонажные растворы. — М.: Издательство "Недра", 1999. — 424 с.
5. Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 1007 с.
6. Веригин Н.Н. Нагнетание вязких растворов в горные породы в целях повышения прочности и водонепроницаемости оснований гидротехнических

сооружений. //Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1952. -№5. С.674-687.

7. *Гаджиев С.Г., Евдокимов И.Н., Елисеев Н.Ю., Лосев А.П.* Обоснование реологической модели утяжеленных буровых растворов на углеводородной основе для гидравлических расчетов // Бурение и нефть. 2017. № 07-08. С. 66-71.

8. *Гиренко К.А., Бородин Т.С., Аймуханова Н.Р., Терентьев Н.Д., Лысова В.Н.* Анализ характеристик буровых растворов. Материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции “Наука и практика” – 2020. Астрахань, 19–30 октября 2020 г. С.91-95.

9. *Григулецкий В.Г., Савельев Ю.П.* Динамические и тепловые поля при турбулентном течении бурового раствора в кольцевом пространстве труб. Изд. Нефть и бизнес // Нефть, газ и бизнес. 2016. №10. С. 3-21.

10. *Дудля Н.А., Третьяк А.Я.* Промывочные жидкости в бурении. Ростов н/Д., 2001. С. 297-300.

11. *Ильясов С.Е., Попов С.Г., Оक्रमелидзе О.В., Нацепинская А.М., Гребнева Ф.Н.* Эмульсионные буровые растворы - тенденции развития технологий // Территория нефтегаза. 2011. №11. С. 14-17.

12. *Исмагилов М.А., Ли Юй Фей, Перепелкин А.С., Дун Жчао, Дихтярь Т.Ч.* Исследование и разработка реагентов для регулирования свойств инвертных эмульсионных растворов // Сб. тр. межд. науч.-технич. конф. «Современные технологии в нефтегазовом деле». 2015. Уфа: Аркаим, 2015. С. 325-329.

13. *Класен В.И.* Омагничивание водных систем. - М., 1982. С. 126-127.

14. *Коваленко А.С.* Комплексная обработка буровых растворов физическими полями. // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. 2003. № 4. С. 103-104.

15. *Комкова Л.П., Чиркунова А.С.* Оптимизация реологических параметров буровых растворов на углеводородной основе в зависимости от горно-геологических условий их применения // Нефтегазовое дело. Том 21. №4. 2023. С.29-36.

16. *Комкова Л.П., Чиркунова А.С.* Регулирование реологических свойств буровых растворов на углеводородной основе в сложных условиях бурения // Нефть. Газ. Новации. 2019. №6. С. 28-29.

17. *Меденцев С.В.* Стабилизация реологического профиля буровых растворов на углеводородной основе // Бурение и нефть. 2007. № 3. С. 28-32.

18. *Мирзаджанзаде А.Х., Ентов В.М.* Гидродинамика в бурении. – М.: Недра, 1985. - 197 с.

19. *Некрасова И.Л.* Совершенствование полученных оценок качества буровых растворов на углеводородной основе в зависимости от горно-геологических условий их применения // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2018. № 2. С. 129-139.

20. *Рязанов Я.А.* Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Издательство “Летопись”, 2005. – 664 с.

21. *Тирон Д.В., Уляшева Н.М.* К вопросу о термодинамической неустойчивости растворов на углеводородной основе // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2015. № 8. С. 25-30.
22. *Хвоцин П.А.* Исследование и разработка инвертного эмульсионного раствора на основе термопластической композиции для промывки скважин в сложных условиях бурения: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2016. 24 С.
23. *Четвертнева И. А., Тетерева Г. А., Шавшукова С. Ю.* Появление, развитие и совершенствование различных типов буровых растворов в мировой и отечественной практике // История и педагогика естествознания. 2019 № 2. с. 25-29.
24. *Четвертнева И. А., Тетерева Г. А., Шавшукова С. Ю.* Создание и развитие практики химической обработки буровых промывочных жидкостей для повышения эффективности нефтедобычи // Нефтегазохимия. 2019. № 1. с. 25-27.
25. *Шерстнёв Н.М., Шандин С.П., Толоконский С.И., Черская Н.О., Уголева А.В.* Применение физических полей для регулирования свойств буровых растворов и тампонажных материалов // Росс. хим. журн. 1995. Т. 39. № 5. С. 59-63.
26. *Gurbanmyradow O., Esedulaýew R., Durdyýew N., Derýaýew A.* Nebit-gaz guýylary gazylanda ýuze çykýan gidrodinamik meseleler we olary çözmekligiň usullary. – A.: Ýlym, 2018. – 335 sah.
27. *Durdyýew N., Gurbanmyradow O.* Çyzykly däl parabolik deňlemeler üçin garyşyk meseleleri çözmekligiň göniler usuly barada. // “Türkmen ylmy täze milli galkynyş zamanýnda” atly ylmy-amaly maslahatyň çykyşlarynyň ýygýndysy. – Aşgabat: Ýlym, 2007. – S.196-203.