

3. Терентьев В. Ф., Петухов А. Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. — М: ИМЕТ РАН – ЦИАМ, 2013. — 515 с.
4. Шанивский А. А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. — Уфа: Монография, 2007. — 500 с.
5. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И., Волков В. И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. — М: Машиностроение, 1993. — 304 с.
6. Кишкина С. И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. — М: Metallurgiya, 1981. — 280 с.
7. Капустин В. И., Степанов В. М. О связи между напряжениями и деформациями при периодических нагружениях / Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 3. С. 92 – 99.

REFERENCES

1. Miller K. J. Materials science perspective of metal fatigue resistance / Anales de mecanica de la fractura. 1995. Vol. 12. P. 1 – 10.
2. Tushinskii L. I., Plokhov A. V., Stolbov A. A., Sindeev V. I. Konstruktivnaya prochnost' kompozitsii osnovnoi metall – pokrytie [Constructive strength of basic metal-coating composition]. — Novosibirsk: Nauka, 1996. — 296 p. [in Russian].
3. Terentjev V. F., Petukhov A. N. Ustalost' vysokoprochnykh metallicheskih materialov [Fatigue of high strength metallic materials]. — Moscow: Izd. A. A Baikov IMET RAN – TsIAM, 2013. — 514 p. [in Russian].
4. Shaniavski A. A. Modelirovanie ustalostnykh razrushenii metallov. Sinergëtika v aviatsii. [Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation]. — Ufa: Monografiya, 2007. — 500 p. [in Russian].
5. Kuznetsov N. D., Tseytlin V. I., Volkov V. I. Tehnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti detalei mashin [Technological methods to improve the reliability of machine parts]. — Moscow: Mashinostroenie, 1993. — 304 p. [in Russian].
6. Kishkina S. I. Soprotivlenie razrusheniyu alyuminievyykh splavov [Fracture resistance of aluminum alloys]. — Moscow: Metallurgiya, 1981. — 280 p. [in Russian].
7. Kapustin V. I., Stepanov V. M. O svyazi mezhdru napryazheniyami i deformatsiyami pri periodicheskikh nagruzheniyakh [Stress-strain relationship for periodic loading] / Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2006. Vol. 47. N 3. P. 92 – 99 [in Russian].

УДК 620.168.37:531.781

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛИ МЕТОДОМ МАГНИТОУПРУГОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

© С. М. Кулак, В. Ф. Новиков¹

Статья поступила 18 февраля 2014 г.

Исследована зависимость напряженности магнитного поля рассеяния локальной намагниченности ΔH_r стали, вызванного вариацией (уменьшением и восстановлением) нагрузки, от величины механических напряжений стального образца. Показана возможность измерения механических напряжений металлических конструкций с помощью метода дозированного разгрузки (уменьшения механического напряжения σ на заданную величину $\Delta\sigma$ и возврата к исходному значению). Физической основой метода является нелинейная зависимость магнитоупругого размагничивания ΔM стали от величины нагрузки σ и ее вариации $\Delta\sigma$. Предложен вариант практической реализации метода.

Ключевые слова: ферромагнетик; магнитоупругое размагничивание; локальная намагниченность; механические напряжения; дозированное разгрузка.

Конструкции, выполняемые из ферромагнитных материалов (например, газо- и нефтепроводы, мосты, вышки высоковольтных линий электропередач, подъемные краны и т.д.), в процессе эксплуатации испытывают постоянно меняющиеся по величине и направлению механические напряжения, которые могут приводить к авариям и разрушению. Наиболее опасными из них являются нагрузки, которые трудно или даже невозможно учесть в расчетах при проектировании: деформации элементов во времени, подвижки грунта, коррозию и многое другое [1 – 7].

¹ Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, Россия; e-mail: physics1@tngnu.tyumen.ru

Поэтому приборный контроль напряженного состояния элементов конструкций является одной из наиболее приоритетных задач в обеспечении их безотказной и безопасной эксплуатации [8 – 13].

На протяжении последних 50 лет механические напряжения металлических конструкций как в нашей стране, так и за рубежом определяют преимущественно расчетными или тензометрическими методами [14 – 16]. Проведенный сравнительный анализ [17] методов, используемых в отечественной нефтегазовой промышленности для определения напряжений, показал, что сходимость их результатов составляет не более 30 %. Кроме того, не все приборные методы мож-

но использовать для измерения механических напряжений эксплуатируемых конструкций, если не известны показания измерительных приборов для ненагруженного состояния металла.

В работах [18 – 21] отмечено, что величина остаточной намагниченности стали (M) с ростом механических нагрузок (σ) от «нуля» изменяется нелинейно. Это означает, что производная $dM/d\sigma$ — эффект магнитоупругого размагничивания — зависит от величины σ . Экспериментальное установление зависимостей $\Delta M = f(\sigma, \Delta\sigma)$ открывает перспективы измерения действующих механических нагрузок ферромагнетика путем их дозированного изменения (вариации), без знания величины M_0 для ненагруженного состояния.

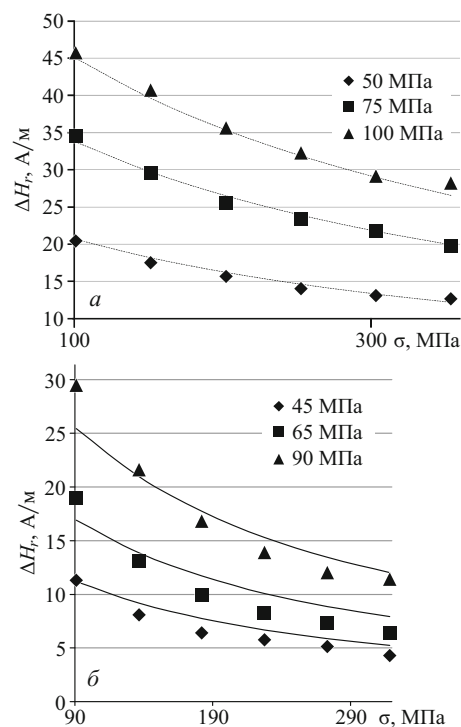
Цель данной работы — изучение возможностей определения механических напряжений в сталях по величине их магнитоупругого размагничивания, вызванного вариацией нагрузки. Научной и практической новизной является то, что предлагаемый метод не требует измерений M_0 для ненагруженного состояния конструкции.

Прежде всего, следовало установить эмпирические зависимости между уровнем магнитоупругого размагничивания ΔM стали, вызванного уменьшением и восстановлением (вариацией) нагрузки $\Delta\sigma$, и величиной действующих в ней напряжений σ .

Для этого необходимо было исследовать характер изменения напряженности магнитного поля рассеяния локальной намагниченности нагруженных сталей вследствие уменьшения и восстановления на прежнем уровне механических напряжений. С этой целью вдоль оси цилиндрического стального образца создавали постоянное механическое растяжение σ (МПа), осуществляли локальное намагничивание, измеряли начальное значение напряженности магнитного поля рассеяния намагниченного участка H_{r1} . Затем механическую нагрузку плавно уменьшали (разгружали) на величину $\Delta\sigma$ и восстанавливали на прежнем уровне. Записывали новые показания феррозондового магнитометра в том же участке H_{r2} . Аналогичные операции проводили при разных значениях σ , $\Delta\sigma$ и на образцах разных марок сталей.

Исследуемые образцы в виде полых цилиндров изготавливали из низкоуглеродистых слаболегированных сталей 10 и 09Г2С, имеющих сравнительно высокую магнитную проницаемость и значительную магнитострикцию. Размеры образцов (внешний диаметр D , длина цилиндрической части, толщина стенки цилиндра δ) из стали 09Г2С и Ст10 составляли: 19, 85, 1 мм и 24, 70, 1 мм соответственно.

С помощью разрывной машины Р-50 создавали растягивающие напряжения вдоль оси цилиндра, не превышающие предела текучести материала. Локальное намагничивание проводили вдоль оси цилиндра путем прикладывания нормально к поверхности выбранного участка четырех постоянных магнитов с чередующимися магнитными полюсами, закрепленными



Зависимости изменения напряженности магнитного поля рассеяния ЛН стали 09Г2С (а) и стали 10 (б) от величины напряжений растяжения σ при различной вариации нагрузки $\Delta\sigma$

ми вдоль прямой на эластичном держателе. В результате создавали матрицу локальных намагниченностей (ЛН) [22], тем самым в значительной мере снимая влияние внешнего магнитного поля на результаты измерений. Для измерения величины магнитного поля рассеяния ЛН использовали прибор ИКНМ-2ФП, имеющий два феррозондовых полузонда.

На рисунке, а показано изменение напряженности магнитного поля $\Delta H_r = H_{r1} - H_{r2}$ локальной намагниченности образца из стали 09Г2С в зависимости от величины постоянной (базовой) осевой растягивающей нагрузки σ при ее вариации на $\Delta\sigma$, равную 50, 75, 100 МПа. Здесь H_{r1} и H_{r2} — нормальные составляющие напряженности магнитного поля рассеивания над выбранным намагниченным участком нагруженного образца и после уменьшения нагрузки на заданную величину $\Delta\sigma$ и ее возврата к исходному значению.

Из рисунка, а видно, что чем меньше базовая нагрузка σ , тем больше изменение напряженности поля рассеяния намагниченного участка (больше размагничивающий эффект) при одинаковой величине вариации нагрузки $\Delta\sigma$. Такая закономерность объясняется тем, что при приложении напряжений создается текстура магнитных доменов, которую изменить тем сложнее, чем больше базовое напряжение σ и меньше величина вариативной нагрузки $\Delta\sigma$. Увеличение $\Delta\sigma$ приводит к росту изменения напряженности магнитного поля ΔH_r , причем чем больше $\Delta\sigma$, тем круче идет зависимость $\Delta H_r(\sigma)$.

Зависимость магнитоупругого размагничивания образца стали 10 от величины постоянного механиче-

ского напряжения при снятии и восстановлении растягивающей нагрузки представлена на рисунке, б. Здесь максимальное значение механических растягивающих напряжений, равное 320 МПа, составило 0,7 от предела текучести материала. Величина вариативной нагрузки $\Delta\sigma$ равнялась 45, 65, 90 МПа. Как и для образца из стали 09Г2С, изменение напряженности магнитного поля рассеяния ΔH , тем меньше, чем выше базовая нагрузка, и тем значительней, чем больше величина вариации напряжения $\Delta\sigma$.

Практически исследуемый эффект [23, 24] можно реализовать следующим образом. На контролируруемую часть металлоконструкции (опору моста, балки, колонны, трубопровода и т.п.) наклеивают тензодатчик для измерения варьируемой осевой нагрузки $\Delta\sigma$; проводят локальное намагничивание (ЛН) в месте наклейки датчика, магнитометром измеряют начальную напряженность магнитного поля в ЛН. Нагруженную конструкцию разгружают и тензометрически регистрируют величину варьируемой нагрузки $\Delta\sigma$. При контроле напряженного состояния конструкций моста нагрузку можно варьировать, если машина или поезд с известной массой покинет и затем вернется на исследуемое место. По изменению напряженности магнитного поля рассеяния вследствие вариации механических напряжений и тарированному графику определяют величину существующей механической нагрузки исследуемого участка металлоконструкции.

Таким образом, показано, что величина изменения напряженности магнитного поля рассеяния локальной намагниченности стальных образцов (из сталей 10 и 09Г2С), вызванного дозированным уменьшением и последующим восстановлением их нагрузки, монотонно зависит от уровня действующих в них напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бородавкин П. П., Березин В. Л.** Сооружение магистральных трубопроводов: учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Недра, 1987. — 471 с.
2. Экспериментальная механика. Кн. I / Под ред. А. Кобаяси; пер. с англ.; под ред. Б. Н. Ушакова. — М.: Мир, 1990. — 607 с.
3. Экспериментальная механика. Кн. II / Под ред. А. Кобаяси; пер. с англ.; под ред. Б. Н. Ушакова. — М.: Мир, 1990. — 551 с.
4. **Кострюкова Н. К., Кострюков О. М.** Локальные разломы земной коры — фактор природного риска. — М.: Изд. Академии горных пород, 2001. — 240 с.
5. **Курочкин В. В., Малюшин Н. А., Степанов О. А., Мороз А. А.** Эксплуатационная долговечность нефтепроводов. — М.: Недра, 2001. — 231 с.
6. **Конакова М. А., Теплинский Ю. А., Романцов С. В., Филиппов А. И.** Аварийные разрушения магистральных газопроводов / Технология металлов. 2005. № 2. С. 17 – 22.
7. **Курочкин В. В., Малюшин Н. А., Степанов О. А., Мороз А. А.** Эксплуатационная долговечность нефтепроводов. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. — 231 с.
8. **Карл Ф. Отт.** Газовая промышленность. Сер.: транспорт, переработка и использование газа в зарубежных странах. Зарубежный опыт: экспресс-информация. Москва, 1991. Вып. 1 – 2.
9. **Мужицкий В. Ф., Попов Б. Е., Безлюдько Г. Я.** Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением / Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 38 – 46.
10. **Баурова Н. И.** Методы неразрушающего контроля при диагностировании металлоконструкций / Механизация строительства. 2009. № 12. С. 21 – 23.
11. **Новиков В. Ф., Захаров В. А., Ульянов А. И., Сорокина С. В., Кудряшов М. Е.** Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей / Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 59 – 68.
12. **Алешин Н. П.** Возможности методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций / Сварка и диагностика. 2011. № 6. С. 44 – 47.
13. **Попов В. А., Корзунин Г. С.** Определение механических напряжений в трубопроводах надземной прокладки / Дефектоскопия. 2009. № 9. С. 39 – 43.
14. **Махутов Н. А., Пермяков В. Н., Хайруллина Л. Б.** Анализ напряженно-деформированного состояния оборудования нефтегазохимических заводов и трубопроводного транспорта в условиях эксплуатации / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 2. С. 69 – 74.
15. **Завьялов А. П., Лукьянов В. А., Якубович В. А.** Разработка рекомендаций по использованию метода конечных элементов при оценке технического состояния трубопроводных обвязок оборудования нефтегазовых производств / Нефть и газ. 2005. № 3. С. 68 – 74.
16. **Бородавкин П. П., Синюков А. М.** Прочность магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1984. — 245 с.
17. **Дубов А. А., Демин Е. А., Миляев А. И., Стеклов О. А.** Опыт контроля напряженно-деформированного состояния газопроводов с использованием метода магнитной памяти металла в сравнении с традиционными методами и средствами контроля напряжений / Контроль. Диагностика. 2002. № 4. С. 53 – 56.
18. **Новиков В. Ф., Важенин Ю. И., Бахарев М. С., Кулак С. М., Муратов К. Р.** Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода. Изд. 2-е, стереот. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2009. — 200 с.
19. **Красневский С. М., Харченко В. В., Алешин Н. Ф., Малышев В. Ф., Калинин И. С., Купченко В. Г.** Исследование локальной остаточной намагниченности при механическом нагружении сталей 17Г1С и 19 Г / Весці АН Беларусі. Сер. Физ.-тэхн. навук. 1995. № 1. С. 14 – 17.
20. **Новиков В. Ф., Бахарев М. С.** Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. — Тюмень: Вектор Бук, 2001. — 220 с.
21. **Костин В. Н., Царькова Т. П., Ничипурук А. П., Лоскутов В. Е., Лопатин В. В., Костин К. В.** Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов / Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 5.
22. Пат. 2154262 РФ, МПК⁷ G01L1/12. Способ определения полей напряжений в деталях из ферромагнитных материалов / Новиков В. Ф., Ершов С. А., Бахарев М. С., Заводовский А. Г., Федоров Б. В.; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет. — № 98120990/28; заявл. 16.11.1998; опубл. 10.08.2000. Бюл. № 11.
23. **Кулак С. М.** Разработка магнитоупругого метода контроля напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. — Тюмень: Тюмен-

ский государственный нефтегазовый университет, 2007. — 157 с.

24. Пат. 2274840 РФ, МПК⁷ G01L1/12. Способ определения механических напряжений в конструкциях из ферромагнитных материалов / Бахарев М. С., Новиков В. Ф., Дягилев В. Ф., Кулак С. М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет». — № 2004132739/28; заявл. 10.11.2004; опубл. 20.04.2006. Бюл. № 11.

REFERENCES

- Borodavkin P. P., Berezin V. L.** Sooruzhenie magistral'nykh truboprovodov: uchebnyk dlya vuzov. 2 edition. — Moscow: Nedra, 1987. — 471 p. [in Russian].
- Éksperimental'naya mekhanika [Experimental mechanics]. Book I / A. Kobayashi; B. N. Ushakov (eds.). — Moscow: Mir, 1990. — 607 p. [Russian translation].
- Éksperimental'naya mekhanika [Experimental mechanics]. Book II / A. Kobayashi; B. N. Ushakov (eds.). — Moscow: Mir, 1990. — 551 p. [Russian translation].
- Kostryukova N. K., Kostryukov O. M.** Lokal'nye razlomy zemnoi kory — faktor prirodnoho riska. — Moscow: Izd. Akademii gornyykh porod, 2001. — 240 p. [in Russian].
- Kurochkin V. V., Malyushin N. A., Stepanov O. A., Moroz A. A.** Ýkspluatatsionnaya dolgovechnost' nefteprovodov. — Moscow: Nedra, 2001. — 231 p. [in Russian].
- Konakova M. A., Teplinskii Yu. A., Romantsov S. V., Filipov A. I.** Аварийные разрушения магистральных газопроводов / Tekhnol. Metallov. 2005. N 2. P. 17 – 22 [in Russian].
- Kurochkin V. V., Malyushin N. A., Stepanov O. A., Moroz A. A.** Ékspluatatsionnaya dolgovechnost' nefteprovodov. — Moscow: JSC «Nedra-Biznesstsentr», 2001. — 231 p. [in Russian].
- Karl F. Ott.** Gazovaya promyshlennost'. Ser.: transport, pererabotka i ispol'zovanie gaza v zarubezhnykh stranakh. Zarubezhnyi opyt: ékspress-informatsiya. Moscow, 1991. Issues 1 – 2 [in Russian].
- Muzhitskii V. F., Popov B. E., Bezlyud'ko G. Ya.** Magnitnyi kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa stal'nykh metallokonstruktsii pod'emnykh sooruzhenii i sudov, rabotayushchikh pod davleniem / Defektoskopiya. 2001. N 1. P. 38 – 46 [in Russian].
- Baurova N. I.** Metody nerazrushayushchego kontrolya pri diagnostirovanii metallokonstruktsii / Mekhaniz. Stroit. 2009. N 12. P. 21 – 23 [in Russian].
- Novikov V. F., Zakharov V. A., Ul'yanov A. I., Sorokina S. V., Kudryashov M. E.** Vliyanie dvukhosnoi uprugoi deformatsii na koýrtsitivnyuyu silu i lokal'nyuyu ostatochnuyu namagnichennost' konstruktsionnykh staley / Defektoskopiya. 2010. N 7. P. 59 – 68 [in Russian].
- Aleshin N. P.** Vozmozhnosti metodov nerazrushayushchego kontrolya pri otsenke napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya nagruzhennykh metallokonstruktsii / Svarka Diagnost. 2011. N 6. P. 44 – 47 [in Russian].
- Popov V. A., Korzunin G. S.** Opredelenie mekhanicheskikh napryazhenii v truboprovodakh nadzemnoi prokladki / Defektoskopiya. 2009. N 9. P. 39 – 43 [in Russian].
- Makhutov N. A., Permyakov V. N., Khairullina L. B.** Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya oborudovaniya neftegazokhimicheskikh zavodov i truboprovodnogo transporta v usloviyakh ékspluatatsii / Probl. Bezopasn. Chrezvych. Sit. 2009. N 2. P. 69 – 74 [in Russian].
- Zav'yalov A. P., Luk'yanov V. A., Yakubovich V. A.** Razrabotka rekomendatsii po ispol'zovaniyu metoda konechnykh élementov pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovodnykh obvyazok oborudovaniya neftegazovykh proizvodstv / Neft' Gaz. 2005. N 3. P. 68 – 74 [in Russian].
- Borodavkin P. P., Sinyukov A. M.** Prochnost' magistral'nykh truboprovodov. — Moscow: Nedra, 1984. — 245 p. [in Russian].
- Dubov A. A., Demin E. A., Milyaev A. I., Steklov O. A.** Opyt kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gazoprovodov s ispol'zovaniem metoda magnitnoi pamyati metalla v sravnenii s traditsionnymi metodami i sredstvami kontrolya napryazhenii / Kontrol'. Diagn. 2002. N 4. P. 53 – 56 [in Russian].
- Novikov V. F., Vazhenin Yu. I., Bakharev M. S., Kulak S. M., Muratov K. R.** Diagnostika mest povyshennoi razrushaemosti truboprovoda. 2 Edition. — Moscow: JSC «Nedra-Biznesstsentr», 2009. — 200 p. [in Russian].
- Krasnevskii S. M., Kharchenko V. V., Aleshin N. F., Malyshchik V. F., Kalinkovich I. S., Kupchenko V. G.** Issledovanie lokal'noi ostatochnoi namagnichennosti pri mekhanicheskom nagruzenii staley 17G1S i 19G / Vestsi AN Belarusi. Ser. Fiz.-Tékhn. Navuk. 1995. N 1. P. 14 – 17 [in Russian].
- Novikov V. F., Bakharev M. S.** Magnitnaya diagnostika mekhanicheskikh napryazhenii v ferromagnetikakh. — Tyumen: Vektor Buk, 2001. — 220 p. [in Russian].
- Kostin V. N., Tsar'kova T. P., Nichipuruk A. P., Loskutov V. E., Lopatin V. V., Kostin K. V.** Neobratimye izmeneniya namagnichennosti kak indikatory napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ferromagnitnykh ob'ektov / Defektoskopiya. 2009. N 11. P. 5.
- Pat. 2154262 RF, МПК⁷ G01L1/12. Способ определения полей напряжений в деталях из ферромагнитных материалов / Novikov V. F., Ershov S. A., Bakharev M. S., Zavodovskii A. G., Fedorov B. V.; applicant and patentee Tyumen State Gas and Petroleum University. — N 98120990/28; applied 16.11.1998; publ. 10.08.2000. Byul. N 11 [in Russian].
- Kulak S. M.** Razrabotka magnitoupругogo metoda kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podzemnykh truboprovodov: dis. ... kand. tekhn. nauk. — Tyumen: Tyumen State Gas and Petroleum University, 2007. — 157 p. [in Russian].
- Pat. 2274840 RF, МПК⁷ G01L1/12. Способ определения механических напряжений в конструкциях из ферромагнитных материалов / Bakharev M. S., Novikov V. F., Dyagilev V. F., Kulak S. M.; applicant and patentee Tyumen State Gas and Petroleum University. — N 2004132739/28; applied 10.11.2004; publ. 20.04.2006. Byul. N 11 [in Russian].