

УДК 66-963:66-5

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ

¹Якименко К.Ю., ²Венгеров А.А., ²Бранд А.Э.

¹АО «Транснефть-Сибирь», Тюмень, e-mail: YakimenkoKY@tmn.transneft.ru;

²ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, e-mail: Allbert-@mail.ru

В статье авторами исследован вопрос возможности применения гидродинамической кавитационной обработки с целью уменьшения вязкости и повышения качества реологических характеристик, таких как напряжения сдвига, вязких и высоковязких нефтей, транспортируемых по трубопроводной транспортной системе России. Разработана кавитационная установка, представляющая из себя кавитационно-сепарационное оборудование, совмещенное с плунжерным насосом. Разработана и предложена технологическая схема применения реактора в системе трубопроводного транспорта нефтей и нефтепродуктов. Представлен результат по проведенным лабораторным экспериментам с элементами комбинирования гидродинамической кавитационной обработки и отечественных депрессорных присадок с графическим отражением времени восстановления реологических свойств. Авторами предложены варианты внедрения технологии на производственные объекты и их технологические обвязки, а также условия ограничения по применению.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, напряжения сдвига, подогрев нефти, вязкость, высоковязкие нефти

TECHNOLOGY APPLICATION OF HYDRODYNAMIC CAVITATION TREATMENT OF HIGH-VISCOSITY OIL PROCESSING IN ORDER OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF TRANSPORTATION

¹Yakimenko K.Yu., ²Vengerov A.A., ²Brand A.E.

¹JSC «Transneft-Siberia», Tyumen, e-mail: YakimenkoKY@tmn.transneft.ru;

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Tyumen State Oil and Gas University», Tyumen, e-mail: Allbert-@mail.ru

The authors investigated the possibility of applying hydrodynamic cavitation treatment to reduce viscosity and improve the quality of rheological characteristics such as shear stress, viscous and high-viscous oil transported by pipeline transport system of Russia. Developed cavitation installation, which is a cavitation-separation equipment, combined with plunger pump. Developed and proposed the technological scheme of application of the reactor in the system of pipeline transport of oil and oil products. Presents the result on the conducted laboratory experiments with elements of combination of hydrodynamic cavitation treatment of domestic and depressants with a graphical reflection of the recovery time of the rheological properties. The authors proposed the options of implementing the technology on production facilities and process piping, as well as the limiting conditions on the application.

Keywords: hydrodynamic cavitation, shear stress, heating oil, viscosity, high viscosity oil

Современная нефтяная отрасль Российской Федерации характеризуется увеличением доли вязких (далее ВН) и высоковязких (далее ВВН) нефтей в общей структуре запасов углеводородного сырья. По данным на 2014 год доля ВН и ВВН от общероссийских составляет почти 30% или 7,5 млрд т, причем за последние годы, начиная с 1992 года, доля постоянно увеличивается [1]. Распространенными способами обработки сырья с целью достижения больших скоростей транспортировки являются: термический нагрев, добавление присадок и разбавителей, применение электромагнитного излучения. Термический нагрев является самым распространенным и эффективным, но одновременно и самым дорогостоящим методом обработки, что в условиях

экономической нестабильности является недопустимым. Нагрев осуществляется подогревателями нефти, такими как печи трубчатые блочного типа (ПТБ-10).

По мнению зарубежных ученых, таких как Ф. Хэммит, Дж. Дейли, из ASME, перспективным является метод гидродинамической кавитационной обработки, характеризующийся эффективностью и экономичностью с целью изменения реологических свойств нефти (структурная вязкость, температура застывания и др.). В рамках реализации гранта компании ОАО «АК «Транснефть» авторами было изучено явление кавитации, возможность совмещения кавитации с депрессорными присадками с целью увеличения эффективности процесса транспортировки и разработано гидродинамическое оборудование.

Явление кавитации возникает в момент приближения давления жидкости и давления насыщенных паров жидкости. При близких значениях в жидкости наблюдается обильное выделение пузырьков (каверн), наполненных растворенным газом [2]. Схлопывание каверны характеризуется резкими скачками температуры и давления, а распространение энергетической волны способствует разрушению близлежащих углеродистых цепочек и молекулярных соединений. Количество пузырьков может варьироваться от 10^4 до 10^6 .

На рис. 1 смоделирован процесс гидродинамической кавитации за счет изменения сечения трубопровода с помощью программного комплекса ANSYS/FLUENT.

Из рис. 1 видно, что основная часть давления приходится на конфуззор, накат на стенку, уменьшение сечения потока нефти способствуют возникновению дополнительных напряжений. Для стабильной работы конфуззор необходимо увеличение

толщины стенки данной части конструкции или применение более стойких материалов.

На рис. 2 показана лабораторная установка, созданная на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», кавитационный реактор обозначен белым цветом в нижнем левом углу стенда и на рис. 3. Лабораторный стенд состоит из следующего оборудования: центробежный насос производительностью $Q = 70$ л/мин и напором $H = 30$ м, составной трубопровод $L = 2,5$ м и $D = 30$ мм, кавитатор с степенью сужения $n = 3$. В процессе исследования было обработано 150 литров ВВН Усинского месторождения.

Измерения вязкости нефти в экспериментах проводились в следующей последовательности:

- а) после кавитационной обработки;
- б) после введения депрессорной присадки;
- в) после комплексного воздействия кавитации и депрессорной присадки.

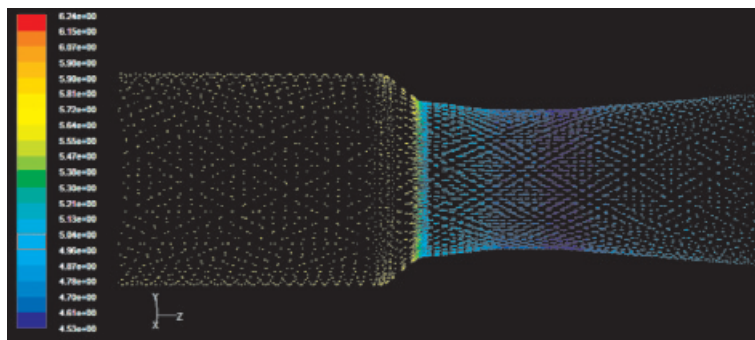


Рис. 1. Векторы распространения давления

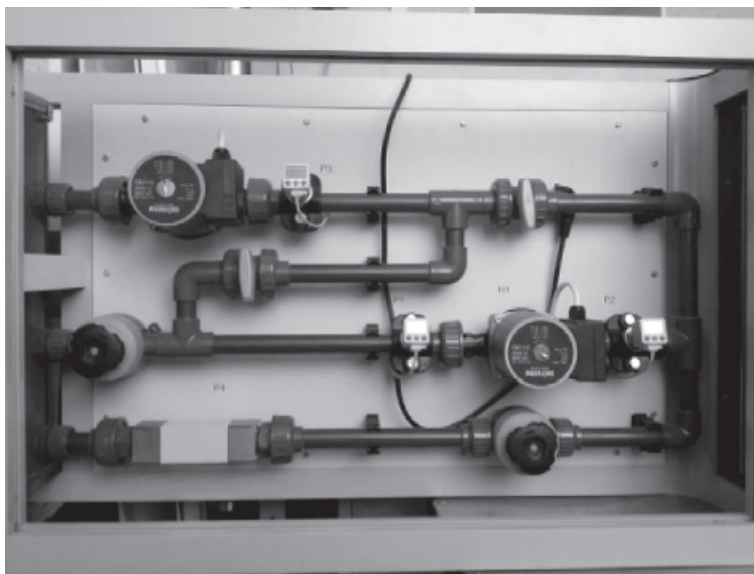


Рис. 2. Лабораторная установка

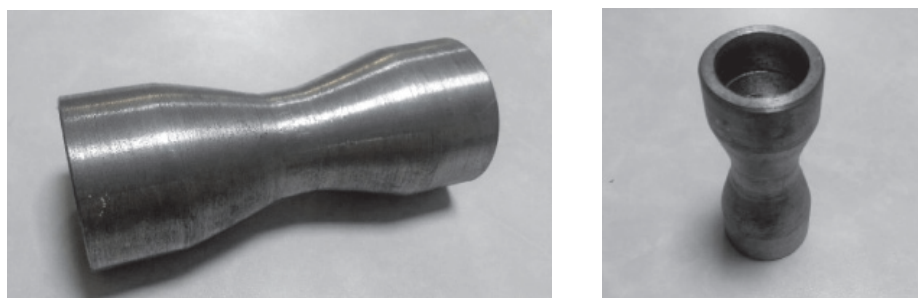


Рис. 3. Прототип гидродинамического кавитационного реактора

Таблица 1

Сравнительный анализ изменения реологии при добавлении присадок

Присадка	% <i>m</i>	Начальная динамическая вязкость, МПа·с	Динамическая вязкость после добавления, МПа·с			
			0–10 часов	10–20 часов	20–30 часов	30–40 часов
Депран	0,015–0,04	320	197	227	251	275
ПАА	0,01–0,05		204	230	256	281
ДПН-1Р	0,002–0,005		181	222	248	266

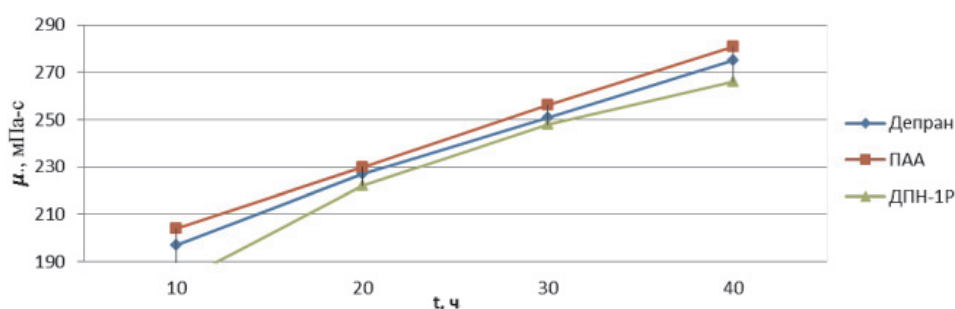


Рис. 4. Депрессорные присадки

Для достижения большего эффекта рассматривалось применение комплексного воздействия с участием кавитации и присадки, при котором присадка эффективнее воздействует на групповые компоненты нефти за счёт уменьшения их размера и увеличения площади контакта. Присадка препятствует восстановлению межмолекулярных связей и образованию надмолекулярных образований в нефти после обработки, за счёт чего достигается больший

эффект снижения вязкости и увеличение времени ее восстановления. В процессе исследований изучалось воздействие на ВВН следующих реагентов: Депран, ПАА, ДПН-1Р, результаты исследования представлены в табл. 1 и на рис. 4. Критерии отбора были следующими: минимальная концентрация, способ введения реагента, влияние реагента на качество нефти, соответствие нормативной документации компании ОАО АК «Транснефть».

Таблица 2

Сравнительный анализ эффективности методов снижения вязкости

Характеристики	ДПН-1Р	Кавитационная обработка	Комплексная обработка
Депрессия $T_{заст}^*$, °С	10–14	5–7	17–20
Снижение вязкости, %	42–57	32–40	до 70
Снижение предельно динамического напряжения	2–3	4	6–7
Снижение предельно статического напряжения	4–5	3–4	5–7
Время восстановления реологических свойств, дней	5–6	4	8

По итогам исследования лучшей показала себя депрессионная присадка ДПН-1Р, состоящая из сополимера этилена, винилацетата, зимнего дизтоплива и депрессорной присадки Dewaxol марки 7801. В дополнение к проведенным экспериментам большую роль играет то, что присадка прошла испытания на участке МН «Уса – Ухта» [3]. Далее была произведена комплексная обработка с применением кавитационной обработки и присадки ДПН-1Р. Конечные данные и сравнительный анализ методов приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Проведенные исследования показали, что комплексная обработка нефти является перспективным направлением исследования. Молекулы присадки способствовали уменьшению времени восстановления реологических свойств и оказывали положительное влияние на разрыв углеводистых цепочек [4].

Энергия схлопывающегося кавитационного пузырька, имеюще-

го сферическую форму, определяется по формуле

$$E = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot P_{кр} \cdot R_{max}^3, \quad (1)$$

где R_{max} – радиус кавитационной каверны перед схлопыванием, который вычисляется по формуле

$$\frac{dR_{max}}{dt} = \sqrt{\frac{2(p_n - p_{кр})}{3\rho}}. \quad (2)$$

Полную энергию, выделяемую при схлопывании кавитационных каверн, запишем через число кавитационных каверн по формуле

$$N = KV_{ж}, \quad (3)$$

где K – концентрация кавитационных каверн ($1/m^3$); $V_{ж}$ – объем жидкости без кавитационных каверн (m^3).

Учитывая формулы (2)–(3), запишем формулу энергии, выделяющейся при схлопывании каверн при развитой кавитации:

$$E = K \cdot V_{ж} \cdot \pi \cdot \frac{85,33 \cdot P_n}{g \cdot v_{кав}} \left(\frac{29 \cdot \rho \cdot g}{P_n} \right)^{1,9} \cdot \int_0^t \left[\frac{2 \left(p_n - \frac{64 \cdot P_n}{g \cdot v_{кав}} \left(\frac{29 \cdot \rho \cdot g}{P_n} \right)^{1,9} \right)^{1,5}}{3\rho} \right], \quad (4)$$

где $t = 0,915 R_{max} \sqrt{\frac{\rho}{P_{кр}}}$ – рэлеевское время полного схлопывания, с.

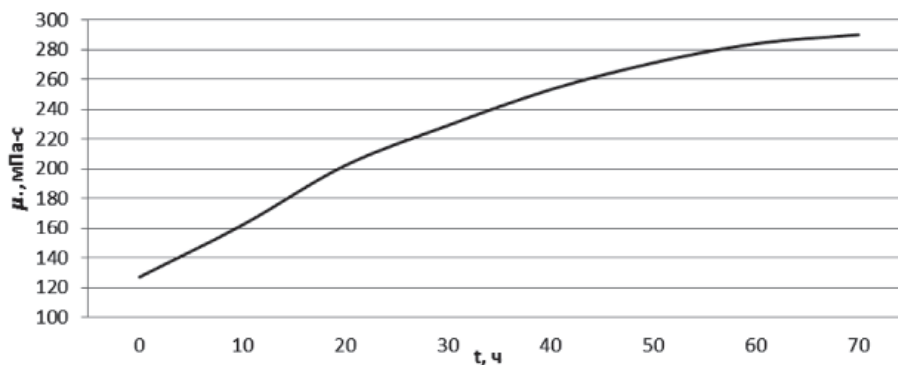


Рис. 5. Зависимость динамической вязкости нефти от времени хранения при комплексной обработке нефти

Таблица 3

Энергозатраты реактора

№ п/п	Перепады давления, $(P_{вх} - P_{вых})/P_{вх}$	W , кВт/т/ч
1	0,4	0,18
2	0,5	0,22
3	0,6	0,25
4	0,7	0,27

В ходе эксперимента также наблюдалось повышение температуры высоковязкой нефти на 2–3 °С. За счет локального повышения температуры, происходящего на границе рабочей камеры – диффузора, нефть частично нагревается, что является предпосылкой для получения экономической выгоды. Таким образом теоретическая и практическая модель доказали свою состоятельность. В табл. 3 приведены энергозатраты реактора при различных перепадах давления, обусловленных различным режимом кавитационной обработки.

Из табл. 3 видно, что с увеличением перепада давления шаг энергозатрат уменьшается. Данная зависимость является частным случаем и не описывает полную картину затрат, но характеризует участок, являющийся наиболее выгодным с экономической точки зрения.

Местом установки устройства был выбран участок, сооружаемый параллельно нитке технологического трубопровода, расположенный перед подогре-

вателем нефти, изображенный на рис. 6. Параллельная нитка введена с целью повышения безопасности основного оборудования на станции.

За счет локального изменения давления и, вследствие этого, создания условий для кавитации и разрыва жидкостной сплошности выделяется энергия. Выделившаяся энергия эквивалентна изменению температуры нефти при средней плотности 945 кг/м³ и вязкости 250 мПа·с на 2–3 °С. В связи с возможностью изменения начальной температуры подогрева нефти, меняются и экономические затраты [5, 6].

Для определения экономической эффективности применения кавитационной обработки приведем краткий экономический расчет потребления ПТБ. Для упрощения расчета примем, что используемый природный газ состоит из 95 % метана и 5 % этана. Необходимое количество воздуха для сжигания топливного газа составляет 21 кг/кг, теплотворная способность газа 35 000 кДж/м³.

Расход топлива ПТБ:

$$P = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{H}} \cdot \eta} = \frac{G \cdot c_p \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})}{Q_{\text{H}} \cdot \eta} = \frac{30 \cdot 10^6 \cdot 2100}{35000 \cdot 0,71} = 2535211 \text{ м}^3/\text{год.}$$

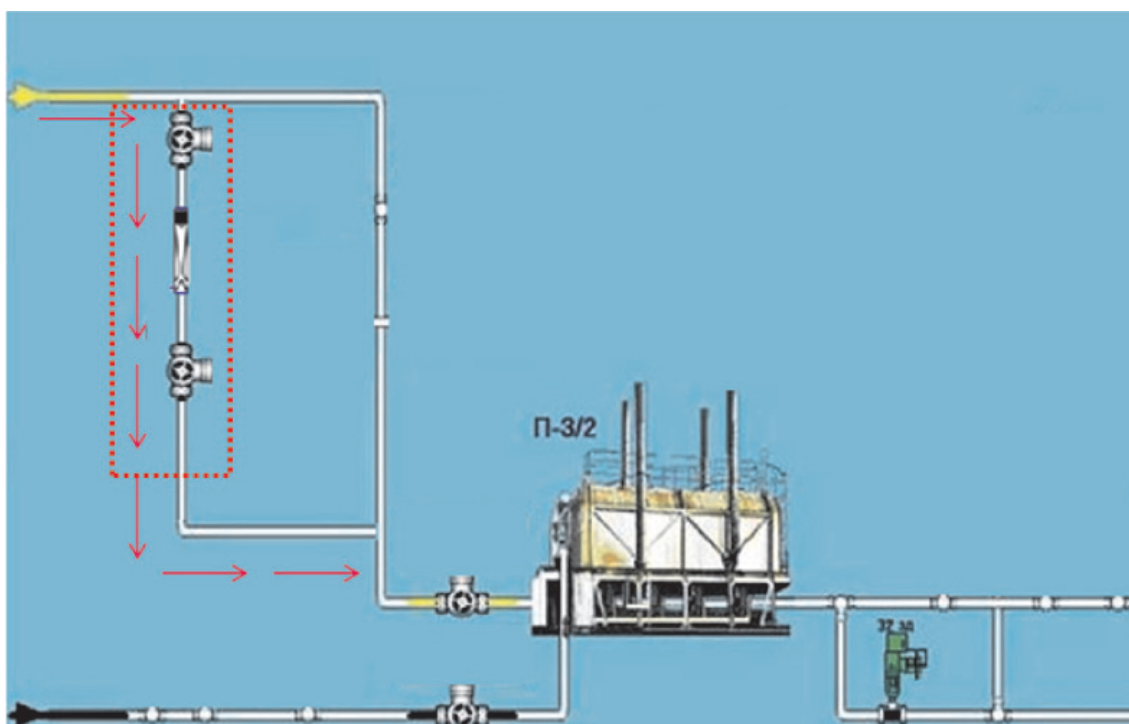


Рис. 6. Технологическая схема установки кавитационного оборудования

Годовой расход топлива ПТБ составляет около 2,5 млн м³, с учетом стоимости газа для крупных промышленных предприятий 2848 руб./1000 м³, годовые затраты составят 216,6 млн рублей при подогреве 30 млн т нефти на 30 °С без учета поддержания температуры по длине нефтепровода [7]. Лабораторный опыт показал, что существует возможность нагрева перекачиваемой нефти на 2–3 °С. Экономический эффект равен эквиваленту сэкономленного количества газа и составляет около 14,4 млн рублей.

Проведенный авторами анализ и расчеты показывают, что применение метода кавитационной обработки с целью уменьшения экономической нагрузки является обоснованным и имеет положительный экономический эффект.

Применяемая технология может быть использована проектными институтами или дочерними обществами компании ОАО «АК «Транснефть»», осуществляющих модернизацию ГНПС, и введена в эксплуатацию на промысловых или технологических трубопроводных системах с диаметрами до 300 мм и значениями вязкости транспортирующих нефтей 250–350 мПа·с.

Список литературы

1. АО «Транснефть – Сибирь»: [Электронный ресурс]. – М., 1994–2015. – URL: <http://sibnefteprovod.transneft.ru/press/news/?id=13931>. (Дата обращения: 12.03.2015).
2. «Об утверждении оптовых цен на газ, используемых в качестве предельных минимальных и предельных максимальных уровней оптовых цен на газ, добываемый ОАО «Газпром» и его аффилированными лицами»: [Электронный ресурс]. – Приказ Федеральной службы по тарифам от 26 сентября 2013 г. № 177-э/2 // СПС КонсультантПлюс: Версия Проф.
3. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 861–869.
4. Тарасенко М.А. Уменьшение вязкости нефти методом гидродинамической кавитации / М.А. Тарасенко, А.Э. Бранд // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014: материалы XV межд. науч.-практ. конф. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2014. – С. 44–45.
5. Трясцин Р.А. Повышение эффективности трубопроводного транспорта высоковязких нефтей в смеси с газоконденсатом при пониженных температурах: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень, 2006.
6. Stashkovskaya N.V. Pipelines of innovation and prosperity / N.V. Stashkovskaya, A.E. Brand // Проблемы функционирования систем транспорта : материалы всерос. науч.-практ. конф. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2013. – С. 25–29.
7. «Neftegaz.RU»: [Электронный ресурс]. – М., 2000–2015. – URL: <http://neftegaz.ru/news/view/131972>. (Дата обращения: 12.03.2015).

References

1. AO «Transneft Siber»: [Elektronnyj resurs]. M., 1994-2015. URL: <http://sibnefteprovod.transneft.ru/press/news/?id=13931>. (Data obrashheniya: 12.03.2015).
2. «Ob utverzhdenii optovykh cen na gaz, ispolzuemykh v kachestve predelnykh minimalnykh i predelnykh maksimalnykh urovnej optovykh cen na gaz, dobyvaemyj ОАО «Gazprom» i ego affilirovannymi licami»: [Elektronnyj resurs]. Elektronnyj resurs.: Prikaz Federalnoj sluzhby po tarifam ot 26 sentyabrya 2013 g. no. 177-e/2 // SPS KonsultantPlyus: Versiya Prof.
3. Promtov M.A. Perspektivy primeneniya kavitacionnykh tehnologij dlya intensivkacii ximiko-technologicheskix processov // Vestnik TGTU. 2008. T.14. no. 4. pp. 861–869.
4. Tarasenko, M. A. Umenshenie vyazkosti nefiti metodom gidrodinamicheskoy kavitacii / M. A. Tarasenko, A.E. Brand // Prirodnye i intellektualnye resursy Sibiri. Sibresurs 2014 : materialy XV mezhd. nauch.-prakt. konf. Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj texnicheskij universitet im. T.F. Gorbacheva, 2014. pp. 44–45.
5. Tryascin R.A. Povyshenie effektivnosti truboprovodnogo transporta vysokovyazkix neftej v smesi s gazokondensatom pri ponizhennyx temperaturax: Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk / Tyumenskij gosudarstvennyj neftegazovyj universitet. Tyumen, 2006.
6. Stashkovskaya N.V. Pipelines of innovation and prosperity / N.V. Stashkovskaya, A.E. Brand // Problemy funkcionirovaniya sistem transporta: materialy vseros. nauch.-prakt. konf. Tyumen: Tyumenskij gosudarstvennyj neftegazovyj universitet, 2013. pp. 25–29.
7. «Neftegaz.RU»: [Elektronnyj resurs]. M., 2000–2015. URL: <http://neftegaz.ru/news/view/131972>. (Dataobrabshheniya: 12.03.2015).