

EVALUATION OF PERFORMANCE OF MOVING PIPELINE ELEMENTS

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ «ПОДВИЖНОГО ТРУБОПРОВОДА»

Roman S. Hrabovskyi
hrabovskyy.r@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3169-7088

Р. С. Грабовский,

д-р техн. наук, проф. кафедры строительной механики

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск

Abstract. The selection and the reasoning of the moving pipelines elements (pipes) to ensure a high level of their reliable and secure operability under given operating conditions with the largest capacity taking into account the rational weight and manufacturability are the main problems in the design stage. In this regard, the use of next-generation pipes to solve the problem of the metal consumption reduction through the use of the pipe steels of the higher strength class (X80, X100) is evident and promising. The possibility of using the pipe steels of the API X100 and API X120I strength class as the elements of moving pipeline has been considered in the article. The dependence of the destructive pressures level for the moving pipeline elements (pipes) on its parameters (D , t), the method of production and the mechanical characteristics (σ_B , $\sigma_{0.2}$) is determined by calculation. The expediency of application of the spiral-welded pipes as moving pipeline elements is justified.

Keywords: moving pipeline; spiral-welded pipe; gas pipeline; failure pressure.

Аннотация. Рассмотрена возможность применения трубных сталей класса прочности API X100 и API X120 в качестве элементов «подвижного трубопровода». Расчетным путем определена зависимость уровня разрушающих давлений для элементов (труб) «подвижного трубопровода» от его параметров (D , t), способа производства и механических характеристик (σ_B , $\sigma_{0.2}$). Обоснована целесообразность применения спиральношовных труб в качестве элементов «подвижного трубопровода».

Ключевые слова: «подвижный трубопровод»; спиральношовная труба; газопровод; разрушительное давление.

Анотація. Розглянуто можливість застосування трубних сталей класу міцності API X100 і API X120 як елементів «рухомого трубопроводу». Розрахунковим шляхом визначено залежність рівня руйнівних тисків для елементів (труб) «рухомого трубопроводу» від його параметрів (D , t), способу виробництва і механічних характеристик (σ_B , $\sigma_{0.2}$). Обґрунтована доцільність застосування спіралношовних труб як елементів рухомого трубопроводу.

Ключові слова: «рухомий трубопровід»; спіралношовна труба; газопровід; руйнівний тиск.

REFERENCES

- [1] Zaytsev Val.V., Zaytsev V.V., Kotova Ye.V., Skripnichenko K.S. Analiz osobennostey trebovaniy klassifikatsionnykh obshchestv k sudam, perevozyashchim szhatyy prirodnyy gaz [Analysis of features of requirements of classification societies to vessels which carry compressed natural gas]. *Zb. nauk. prats NUK* [Collection of Scientific Publications NUS], 2010, no. 5, issue 434, pp. 11–18.
- [2] Votintsev A.V. Transportirovka szhatogo prirodnogo gaza [Compressed natural gas transportation]. *Gazovaya promyshlennost – Natural gas industry*, 2002, no. 2, pp. 62–63.
- [3] Goritskiy V.N., Nesterov G.V., Yegorov V.A. Kharakteristiki staticheskoy treshchinostoykosti metalla v spiralnoshovnykh trubakh [Characteristics of static crack resistance of metal in spiral-welded pipes]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika – Pipeline transport: theory and practice*, 2007, no. 3, issue 9, pp. 44–49.
- [4] Yemelyanov A.V., Stolyarov V.I., Kazachkov V.I. Otsenka sluzhebnykh kharakteristik spiralnoshovnykh trub dlya magistralnykh gazonefteprovodov metodami polnomasshtabnykh ispytaniy [Evaluation of service characteristics of spiral-welded pipes for main gas oil pipelines using full-scale testing methods]. *Teritoriya «Neftegaz» – «Naftogaz» Territory*, 2010, no. 8, pp. 70–73.

- [5] Zaitsev Val.V. *Naukovi osnovy efektyvnoho transportuvannia stysnutoho pryrodnoho hazu morskymy akvatori-iamy*. Dokt. Diss [Scientific basis of efficient transportation of compressed natural gas by marine areas. Doctor Thesis.]. Ivano-Frankivsk, 2013. 284 p.
- [6] Zaytsev Val.V. Predvaritel'naya optimizatsiya modulya sudovogo podvizhnogo truboprovoda [Preliminary optimization of module of the ship moving pipeline]. *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* [Automation of marine technical facilities], 2012, issue 18, pp. 44–52.
- [7] Zankovets P.V. Ispolzovanie matematicheskogo modelirovaniya dlya issledovaniya vliyaniya svarochnykh materialov na kachestvo svarnykh soedineniy truboprovodov [Using mathematical modeling to study the effect of welding materials on the quality of welded joints of pipelines]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika – Pipeline transport: theory and practice*, 2010, no. 4, pp. 24–27.
- [8] Ivantsov O.M. Trebovaniya k trubam dlya stroitelstva truboprovodov novogo pokoleniya [Requirements for pipes for pipeline construction of new generation]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika – Pipeline transport: theory and practice*, 2005, no. 1, pp. 26–28.
- [9] Kryzhanivskiy Ye.I., Nykyforchyn H.M. *Koroziino-vodneva dehradatsiia naftovykh i hazovykh truboprovodiv ta ii zapobihannia. Tom 3: Dehradatsiia hazoprovodiv ta ii zapobihanni* [Corrosion-hydrogen degradation of oil and gas pipelines and its prevention. V. 3: Degradation of pipelines and its prevention]. Ivano-Frankivsk – Lviv, Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu Publ., 2012. 433 p.
- [10] Kryzhanivskiy Ye.I., Zaitsev Val.V. Kontsepsiia alternatyvnoho postachannia pryrodnoho hazu do Ukrainy [The concept of alternative natural gas supplies to Ukraine]. *Vseukrainskyi shchokvartalniy naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch»* [Ukrainian quarterly scientific technical journal, «Exploration and development of oil and gas fields»], 2010, no. 4, issue 37, pp. 5–13.
- [11] Mazur I.I., Ivantsov O.M. *Bezopasnost truboprovodnykh sistem* [Safety of pipeline systems]. Moscow, Elima Publ., 2004. 1104 p.
- [12] Varlamov N.V., Makarov G.I., Polikarpov K.V. et al. Naturalnye ispytaniya trub i remontnykh konstruktsiy na ispytatelnom poligone OAO VNIIST [Actual test of tubes and repair constructions on the JSC APCSRI proof ground]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika – Pipeline transport: theory and practice*, 2010, no. 6, issue 22, pp. 4–7.
- [13] Savitskiy M.M., Savitskiy A.M., Suprunenko V.A., Zaytsev Val.V., Zaytsev V.V. Opredelenie parametrov oblegchennykh stalnykh ballonov dlya gruzovoy sistemy CNG-gazovozov [Defining the parameters of lightweight steel cylinders for CNG gas carriers cargo system]. *Elektronne vydannia Visnyk NUK – NUS Journal. Electronic Edition*, 2013, no. 1, pp. 4–14.
- [14] Pyshmintsev I.Yu., Stolyarov V.I., Kazachkov V.I. et al. Primenenie vysokokachestvennykh trub – garantiya ot lavinoobraznogo razrusheniya truboprovoda vysokogo davleniya [Application of high-quality tubes as a guarantee from the explosive fracture of high pressure pipeline]. *Teritoriya «Neftegaz» – «Naftogaz» Territory*, 2007, no. 10, pp. 54–57.
- [15] Papka S.D., Stevens J.H., Macia M.L. et al. Full-Size testing and analysis of X120 linepipe. *Proc. of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, May 25–30*, 2003, pp. 50–59.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Потери газа при транспортировке наземными магистральными газопроводами составляют 2...8 %, при транспортировке морским путем сжиженного газа (LNG) – 8...10 %. Доставка сжатого газа (CNG) морем на расстояние 500...3000 морских миль экономически более целесообразна, поскольку потери при загрузке/разгрузке составляют 2...5 % [2].

Однако CNG-технологии относятся к наиболее наукоемким и их реализация связана с необходимостью решения целого комплекса научных проблем. Здесь возникает, в первую очередь, вопрос обеспечения надежности эксплуатации элементов оборудования («подвижного трубопровода») для перевозки газа

в условиях циклической нагрузки внутренним давлением до 25 МПа и резких перепадов температуры [5]. В связи с этим необходимо разработать методические рекомендации для обеспечения надежности «подвижного трубопровода» на стадиях его проектирования, изготовления и эксплуатации.

«Подвижный трубопровод» – длинномерный трубопровод, конструктивно составленный из стандартных газопроводных труб, соединенных электросваркой через стандартные отводы, и размещенный в модуле, который имеет геометрический размер 40-футового морского контейнера.

Основным заданием на стадии проектирования является выбор и обоснование элементов «подвижного трубопровода» с целью обеспечения надежной

и безопасной их работы в заданных условиях эксплуатации.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Новейшей концепции технологии морского транспортирования сжатого газа посвящены работы [1, 6, 10]. Предлагаемая технология предусматривает использование трубопроводов высокого давления (20...25 МПа), по которым газ с месторождения поступает в магистральную систему высокого давления судна-контейнеровоза, со следующей транспортировкой по трубам меньшего диаметра к каждому CNG-модулю (контейнеру). В основу такой технологии положены прямошовные трубы, которые укреплены композиционным материалом. При намотке технологической ленты до определенной толщины она укладывается перпендикулярно продольному шву. Такая комбинированная конструкция является равнопрочной, т. е. одновременно исчерпываются параметры прочности стеклопластика и металла [13].

Однако в настоящее время при производстве труб широко применяют новейшие технологии [3, 4, 8, 11, 12]. Они обеспечивают более эффективную и безопасную работу наземных магистральных газопроводов при повышенном давлении (9,8...14,0 МПа), высокие характеристики свариваемости стали, высокую прочность стали (σ_B , $\sigma_{0,2}$) и повышенное сопротивление вязкому разрушению (высокие характеристики статической трициностойкости K_c и ударной вязкости KCV). Предлагаемые технологии предполагают при изготовлении спиральношовных труб использование сталей высокого класса прочности API X80, API X100 и API X120. Эти трубы по сравнению прямошовными дополнительно имеют ряд преимуществ:

- не требуют калибровочных процедур (холодного экспандирования или калибровки на вальцах);
- механические характеристики отвечают показателям исходного металла, в то время как результатом калибровочных процедур является уменьшение пластичности и вязкости, поэтому спиральношовные трубы более надежны;
- положение сварного шва и направление прокатки рулона чрезвычайно благоприятны для основных действующих напряжений.

За рубежом были изготовлены и успешно испытаны трубы из стали классов прочности API X100 и API X120, что примерно отвечает классам прочности K80 и K100. Использование этих труб экономически целесообразно и эффективно при строительстве про-

тяженных газопроводов высокого давления (15 МПа) [9], причем при проектировании газопроводов из новых труб при других равных условиях расчетная толщина стенки трубы уменьшится на 5...10 % [12].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – расчетным путем определить зависимость уровня разрушающих давлений элементов (труб) «подвижного трубопровода» от их параметров (D , t), способа производства и механических характеристик (σ_B , $\sigma_{0,2}$) трубной стали.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Практика эксплуатации трубопроводов ответственного назначения свидетельствует, что 85 % аварий и катастроф на этих объектах происходит из-за разгерметизации или отказа сварных соединений [7].

Результаты натурных исследований труб (914×16 мм и 762×16,3 мм) категории API X120 показали, что восемь из девяти труб разрушились вдоль оси трубы, по стыковому сварному шву и только в одной трубе разрушение произошло в основном металле в том же направлении [15]. Разрушения труб вдоль оси связывают с наибольшими кольцевыми растягивающими напряжениями, которые возникают в радиальном направлении при действии на стенку трубы внутреннего давления.

Практика и результаты экспериментов свидетельствуют, что в реальных условиях сварочного производства труб возникают дефекты. Их связывают с металлургическими, термическими и гидродинамическими явлениями. Вследствие этих явлений возникают кристаллизационные и холодные трещины в металле шва, поры, шлаковые каналы, флокены, зоны несплавления, утяжины, отклонения от необходимой прочности и пластичности металла шва и сварного соединения, а также неблагоприятные изменения металла околошовной зоны [7].

Отметим, что характеристики прочности материала трубы и ее сварного шва отличаются незначительно (табл. 1) т. е. $\sigma_B^{OM} \approx \sigma_B^{CIII}$. Однако при проектировании «подвижных трубопроводов» необходимо учитывать, что металл корпуса трубы до разрушения подвергается незначительной пластической деформации, тогда как металл зоны термического влияния сварного шва накапливает существенный уровень деформации, что и приводит к ее разрушению [9].

Рассмотрим высокопрочные трубы, используемые в последнее время для строительства магистральных газопроводов [9, 15]. Их параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний прочности труб на разрыв под действием внутреннего давления

Сталь	D	t	σ_B^{OM}	σ_B^{CIII}	P_f^3	P_f^p	k , %
	мм		МПа				
API X120	914,0	16,0	972	1007	37,75	30,94	22

Для оценки величины разрушительного (критического) давления в области сварного шва спиральношовной трубы использовали формулу

$$P_f = \frac{\sigma_B / 1,1}{\cos^2 \beta + 0,5 \sin^2 \beta} \cdot \frac{2t}{D} \quad (1)$$

где β – угол наклона сварного шва; σ_B – предел прочности металла трубы; D – внешний диаметр трубы; t – толщина стенки трубы [11].

Сравним результаты испытаний прочности на разрыв под действием внутреннего давления P_f^3 с расчетным значением величины разрушительного давления P_f^p согласно формуле (1):

$$k = \frac{|P_f^3 - P_f^p|}{P_f^p} \cdot 100 \% = 22,0 \%$$

Результаты экспериментальных испытаний и аналитических расчетов свидетельствуют о достоверности и возможности практического применения формулы (1), поскольку расчетные значения разрушительного давления P_f^p отличаются от экспериментальных значений на 22,0 %. Такое расхождение можно считать приемлемым, поскольку несколько меньшие расчетные значения P_f^p служат неким коэффициентом запаса прочности рассматриваемого трубопровода.

Используя формулу (1), рассчитаем величину разрушительного (критического) давления P_f в области

сварного шва спиральношовной трубы. Результаты расчетов представим в виде графической зависимости величины разрушительного давления P_f от угла наклона β сварного шва к оси трубы (рис. 1).

Известно [11], что при изготовлении спиральношовных труб угол наклона сварного шва к оси трубы $\beta \approx 40^\circ$. Сравним величины разрушительного давления сварных швов прямошовной ($\beta \approx 0^\circ$) и спиральношовной ($\beta \approx 40^\circ$) труб одинакового типоразмера категории API X120:

$$k = \frac{P_f^{40^\circ}}{P_f^{0^\circ}} = 1,26.$$

Заметим, что при проектировании газопроводов из новых труб при других равных условиях расчетная толщина стенки трубы уменьшится на 5...10 % [12].

Основой для расчета уровня разрушающих давлений P_f элементов (трубы сталь 30ХГСА «подвижного трубопровода») служили результаты (табл. 2), полученные в работах [5, 13]. Согласно этим результатам для облегчения конструкции элементы «подвижного трубопровода» имеют двухшаровую структуру. Внутренний шар – стандартные стальные трубы, внешний шар – намотанный стеклопластик. Причем в первом приближении принято считать, что стальной и стеклопластиковый шары равнопрочные ($P_f^{CT} \approx P_f^{CK}$) и имеют одинаковую толщину. Следовательно, разрушающее давление элементов (труб «подвижного трубопровода» $P_f^{ПТ} \approx P_f^{CT} + P_f^{CK}$.

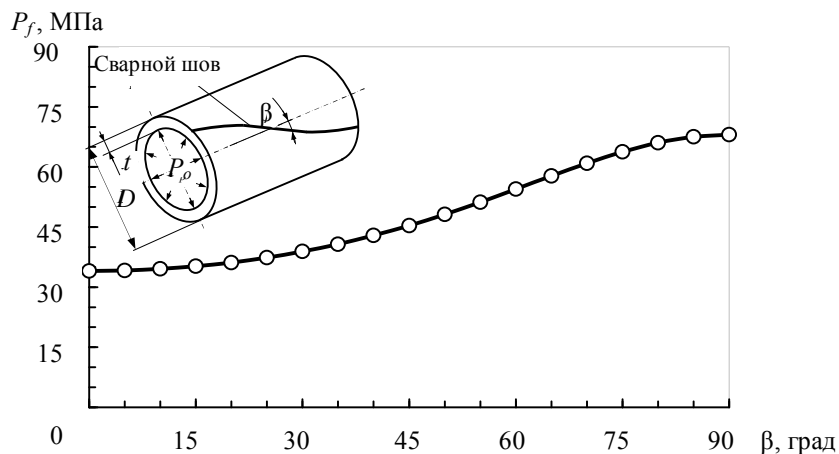


Рис. 1. Зависимость величины разрушительного давления P_f в области сварного шва от угла его наклона β к оси трубы

Таблица 2. Расчетные параметры уровня разрушающих давлений P_f элементов (труб улучшенного качества) «подвижного трубопровода»

Сталь	D	t_{CT}	$t_{ПТ}$	σ_B	P_f^{CT}	$P_f^{ПТ}$
					МПа	
30ХГСА	720,0	8,0	16,0	1080	21,82	43,64
API X100	720,0	8,0	16,0	886	17,90	39,72
API X120	720,0	8,0	16,0	972	19,64	41,46

Кроме того, следует отметить, что обоснование применения труб улучшенного качества (класс прочности API X100), которые обеспечивают стабильную, длительную и безопасную эксплуатацию газопроводов с рабочим давлением 9,8...14,0 МПа, требует применения современных критериев оценки работоспособности – характеристик статической трещиностойкости металла в конструкции трубы.

В работе [12] были проведены натурные испытания экспериментальных труб (1220×15 мм) класса прочности API X100. Установлено, что разрушение труб проходило по вязкому механизму при плосконапряженном состоянии металла в зоне разрушения. Пластичная деформация – утончение кромок разрыва в надрезе и в вершине сквозной трещины составляет $\varepsilon_t = -(35...40)\%$. Для экспериментальной стали класса прочности API X100 критический коэффициент интенсивности напряжений был $K_C = 593 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$. Заметим, что согласно стандартным требованиям к трубам высшей категории качества класса прочности API X100 установлено минимальное значение критического коэффициента интенсивности напряжений на уровне $K_C^{\text{min}} = 400 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

Проведенные испытания [11] свидетельствуют, что спиральношовные трубы (1420×21,6 мм) класса прочности API X70, которые изготовлены из стали контролируемой прокатки, отличаются высокой способностью препятствовать распространению продольного (вдоль оси трубы) вязкого разрушения. Установленный факт является гарантией высокой надежности газопроводов с рабочим давлением 9,8 МПа.

Установленные в работах [3, 4, 9, 11, 12, 15] факты в равной степени можно учитывать при проектировании «подвижных трубопроводов». При выборе материала для элементов (труб) «подвижного трубопровода» и для оценки их работоспособности при длительном влиянии эксплуатационных нагрузок результаты сравнительных натурных испытаний фрагментов труб с продольными надрезами для определения статической трещиностойкости при развитии трещины в осевом направлении в условиях плосконапряженного состояния необходимо дополнить результатами испытаний металла труб и сварных соединений для определения характеристик циклической трещиностойкости C_n , ΔK_{th} , ΔK_{fc} – параметрами уравнения Пэрриса [9, 12].

ВЫВОДЫ

1. Определение расчетным путем уровня разрушающих давлений элементов труб «подвижного трубопровода» доказало, что в качестве конструктивных элементов «подвижного трубопровода» целесообразно использовать секции спиральношовных труб, соединяемых электросваркой через стандартные отводы, которые укладываются в модуль, имеющий геометрические размеры и конструкцию посадочных элементов, соответствующие размерам 40-футового морского контейнера.

2. Результаты расчетов показали, что в зависимости от принятого коэффициента запаса прочности представляется возможным выбрать одну из рассматриваемых газопроводных сталей в качестве основы для конструктивных элементов (труб) «подвижных трубопроводов».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Анализ особенностей требований классификационных обществ к судам, перевозящим сжатый природный газ [Текст] / Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев, Е. В. Котова, К. С. Скрипниченко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2010. – № 5 (434) – С. 11–18.
- [2] **Вотинцев, А. В.** Транспортировка сжатого природного газа [Текст] / А. В. Вотинцев // Газовая промышленность. – 2002. – № 2. – С. 62–63.
- [3] **Горицкий, В. Н.** Характеристики статической трещиностойкости металла в спиральношовных трубах [Текст] / В. Н. Горицкий, Г. В. Нестеров, В. А. Егоров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – М., 2007. – № 3 (9). – С. 44–49.
- [4] **Емельянов, А. В.** Оценка служебных характеристик спиральношовных труб для магистральных газонефтепроводов методами полномасштабных испытаний [Текст] / А. В. Емельянов, В. И. Столяров, В. И. Казачков // Территория «Нефтегаз». – 2010. – № 8. – С. 70–73.
- [5] **Зайцев, Вал. В.** Наукові основи ефективного транспортування стиснутого природного газу морськими акваторіями [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.13 / Зайцев Вал. В. – Івано-Франківськ, 2013. – 284 с.
- [6] **Зайцев, Вал. В.** Предварительная оптимизация модуля судового подвижного трубопровода [Текст] / Вал. В. Зайцев // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – О. : ОНМА, 2012. – Вип. 18. – С. 44–52.
- [7] **Занковец, П. В.** Использование математического моделирования для исследования влияния сварочных материалов на качество сварных соединений трубопроводов [Текст] / П. В. Занковец // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2010. – № 4. – С. 24–27.

- [8] **Иванцов, О. М.** Требования к трубам для строительства трубопроводов нового поколения [Текст] / О. М. Иванцов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2005. – № 1. – С. 26–28.
- [9] **Крижанівський, Є. І.** Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст] : наук.-техн. посіб. : у 3 т. / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин; під заг. ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ ; Л. : вид-во Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу, 2012. – Т. 3 : Деградація газопроводів та її запобігання. – 433 с.
- [10] **Крижанівський, Є. І.** Концепція альтернативного постачання природного газу до України [Текст] / Є. І. Крижанівський, Вал. В. Зайцев // Всеукр. шоквартальний наук.-техн. журнал «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ». – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – № 4 (37). – С. 5–13.
- [11] **Мазур, И. И.** Безопасность трубопроводных систем [Текст] / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М. : Елима, 2004. – 1104 с.
- [12] Натуральные испытания труб и ремонтных конструкций на испытательном полигоне ОАО ВНИИСТ [Текст] / Н. В. Варламов, Г. И. Макаров, К. В. Поликарпов [и др.] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2010. – № 6 (22). – С. 4–7.
- [13] Определение параметров облегченных стальных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов [Электронный ресурс] / М. М. Савицкий, А. М. Савицкий, В. А. Супруненко, Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Вісник НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [14] Применение высококачественных труб – гарантия от лавинообразного разрушения трубопровода высокого давления [Текст] / И. Ю. Пышминцев, В. И. Столяров, В. И. Казачков [и др.] // Территория «Нефтегаз». – 2007. – № 10. – С. 54–57.
- [15] Full-Size testing and analysis of X120 linepipe [Text] / S. D. Papka, J. H. Stevens, M. L. Macia [et al.] // Proc. of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. – Honolulu, Hawaii, 2003. – P. 50–59.

© Р. С. Грабовський

Надійшла до редколегії 24.06.2014

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук Вал. В. Зайцев