

Анализ эффективности снижения потерь водорода в трубопроводе из различных аустенитных коррозионностойких сталей



А. П. Петкова,
профессор кафедры
материаловедения
и технологии
художественных изделий
(МиТХИ)¹, докт. техн. наук,
эл. почта: apetkova@inbox.ru



В. А. Злотин,
аспирант кафедры МиТХИ¹,
эл. почта: zlotinvladimir@mail.ru

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

В целях снижения выбросов в атмосферу углекислого газа, образующегося в результате применения на производстве и в быту нефтепродуктов, предложено использование водорода как экологически чистого энергетического ресурса вместо стандартных видов топлива. Однако водород обладает высокой проникающей способностью, что ведет к его неизбежным диффузионным потерям через стенку трубопровода в процессе транспортировки и хранения. На основании литературных данных и математических преобразований предложена расчетная модель для оценки утечки водорода при перекачке по трубопроводу под давлением до 1,2 МПа при температуре перекачиваемой среды от 300 до 600 К. С использованием табличных литературных данных по коэффициентам проницаемости на основании расчетной модели определены возможные потери водорода при его транспортировке по трубопроводу, выполненному из разных марок аустенитных коррозионностойких сталей (304, 304L, 310, 316, 316L, 316LN, 321, 21-6-9, 21-9-9) при температурах от 300 до 600 К. По результатам расчетов установлено, что самым эффективным материалом по снижению проницаемости водорода является сталь 304L (максимальные потери ~69 л/год при температуре 600 К), а наименее эффективным — сталь 310 (903 л/год при температуре в 600 К). В остальных сталях объем потерь варьируется в диапазоне ~200–300 л/год. Анализ состава сталей показал, что снижение концентрации углерода, азота, серы и фосфора приводит к повышению ее стойкости к проникновению водорода.

Ключевые слова: компримированный водород, трубопровод, проницаемость, диффузия, потери, аустенитные стали, транспортирование.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.08

Введение

Одним из основных факторов стабильного развития и политического суверенитета любого государства является его энергетическая безопасность [1]. В настоящее время основным видом энергетического ресурса является нефть и природный газ. Существует множество способов их добычи, переработки, транспортировки, хранения и реализации, подтверждающих высокий уровень развития нефтегазовой отрасли. Однако существует множество проблем, начиная от обеспечения надежности оборудования и конструкций [2, 3] и заканчивая борьбой с выбросами CO₂ [4]. Последнее стало особенно актуальным в мире в XXI в. ввиду значительного изменения климата и загрязнения окружающей среды при эксплуатации нефтегазового оборудования. В настоящее время существуют два основных направления решения этой проблемы: развитие в нефтегазовой отрасли технологий, позволяющих снизить углеродный след [5, 6], и применение экологически чистых источников энергии. Во втором случае наибольший интерес представляет водород [7] как вид топлива, являющегося аналогом природного газа по применению.

В отличие от нефти и продуктов природного газа, при сжигании водорода образуется не двуокись углерода, а водяной пар, что позволяет снизить углеродный след в атмосфере. Тем не менее внедрение водорода в мировую энергетику затруднено ввиду следующих факторов:

- относительно молодого рынка, не позволяющего сформировать адекватный спрос [8];
 - возможности реализации водородной промышленности только в долгосрочной перспективе [9];
 - недостаточно развитых водородных технологий [10].
- Последнее является основным фактором, так как водород оказывает негативное воздействие на металл конструкции, ухудшая его пластичность и трещиностойкость [11, 12]. Также из-за высокой проникающей способности могут возникать потери водорода за счет его диффузии через стенку объекта водородной промышленности [13].

Особенно острой эта проблема является для трубопроводного транспортирования водорода, где характерны большие нагрузки по давлению и температуре. Одним из способов решения этой проблемы является применение смеси метана с водородом (20–30 % H), что позволяет использовать существующую газовую инфраструктуру без значительных изменений режимов эксплуатации [14]. Тем не менее применение самой смеси не является универсальным, так как подходит не для всех отраслей предприятия, и в таких случаях требуется внедрение систем сепарации [15]. Поэтому важно исследование транспортировки именно чистого водорода.

На практике для улучшения защитных и эксплуатационных параметров трубопроводов часто применяют внутренние и внешние защитные покрытия [16, 17]. По аналогии для

водородопроводов предлагают применение покрытий-барьеров, снижающих суммарную проницаемость водорода [18, 19]. С другой стороны, возможно производство трубопроводов из материалов с низкой водородопроницаемостью, например из хорошо себя зарекомендовавших аустенитных коррозионно-стойких сталей, обладающих наилучшим сопротивлением к диффузии водорода [20]. Важно отметить, что такая технология не сможет подойти для магистральных трубопроводов, простирающихся на большие расстояния, так как внедрение подобной технологии потребует больших экономических затрат. Тем не менее аустенитные стали можно применять, например в пределах предприятий по производству водорода, где условия транспортировки наиболее опасны, так как температура перекачиваемого продукта может быть довольно высокой, что непосредственно влияет на диффузионную активность водорода. Так, при производстве водорода методом парового риформинга с применением катализаторов на основе меди температура перекачиваемого продукта может возрасти до 300 °С, а при применении других катализаторов и выше [21]. Таким образом, при транспорте синтез-газа (смеси водорода с монооксидом углерода) от риформинговой установки до системы охлаждения температура продукта составляет ~600 К [22], что может приводить к потенциальным потерям перекачиваемого продукта.

Таблица 1

Проницаемость водорода в некоторых аустенитных сталях

Номер	Марка стали	$\Phi_0 \cdot 10^4$, моль/(м _{ТВ} ·с·МПа ^{0,5})	E_Φ , кДж/моль	Источник
1	304	2,85	62,43	[23]
2	304L	4,11	71,23	[24]
3	310	2,84	56,56	[25]
4	316	1,52	60,68	[26]
5	316L	1,8	64,03	[27]
6	316LN	1,85	60,66	[23]
7	321	2,44	62,7	[23]
8	21-6-9	2,52	61,29	[23]
9	21-9-9	2,83	62,29	[23]

Таблица 2

Химический состав исследуемых аустенитных сталей, % (мас.)

Марка стали	Основные элементы							Дополнительные элементы, %	Источник
	Fe	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	C		
304	71*	8,82	18,63	–	1,22	0,47	0,062	0,035 P; 0,022 S	[23]
304L	71	9,5	18	–	0,7	0,3	0,033	0,013 P; 0,015 S	[24]
310	53*	19,32	25,14	0,07	1,66	0,48	0,035	0,01 S; 0,02 Al; 0,15 Cu; 0,03 Ti; 0,13 Co	[25]
316	64,7*	13,6	16,2	2,46	1,81	1	0,077	0,029 P; <0,003 S; 0,089 Ti; 0,0032 B; 0,04 Nb; <0,01 Co	[26]
316L	65,4*	12,23	17,41	2,3	1,81	0,45	0,025	0,2 Cu; 0,17 Co	[27]
316LN	66*	12,3	16,96	2,71	1,48	0,39	0,025	0,007 P; <0,005 S; 0,23 N	[23]
321	72*	8,08	17,96	–	0,49	0,84	0,053	0,032 P; 0,01 S; 0,51 Ti	[23]
21-6-9	62*	7,56	20,27	–	9,26	0,4	0,031	0,027 P; <0,003 S; 0,26 N; 0,03 Al; 0,08 Cu; 0,05 Ti	[23]
21-9-9	61*	9,45	19,58	–	9,3	0,33	0,032	0,034 P; <0,003 S; 0,27 N; 0,02 Al; 0,08 Cu; 0,05 Ti	[23]

* Рассчитано авторами, исходя из заданного состава.

Целью данной работы является оценка на основании разработанной расчетной модели влияния химического состава аустенитных коррозионно-стойких сталей на стойкость выполненного из них трубопровода к проникновению в несущую стенку транспортируемого водорода при эксплуатационных температурах перекачиваемой среды до 600 К.

Материал и методика исследования

Расчетный анализ утечки водорода выполнили на моделируемом участке трубопровода, полученном из различных марок аустенитных сталей (304, 304L, 310, 316, 316L, 316LN, 321, 21-6-9, 21-9-9). Справочные данные (Φ_0 , E_Φ) для определения проницаемости водорода Φ (моль/(м_{ТВ}·с·МПа^{0,5})) через сталь по формуле (1), описываемой законом Аррениуса, и химический состав сталей представлены в **табл. 1 и 2** соответственно.

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \exp(-E_\Phi/RT), \tag{1}$$

где Φ_0 — предэкспоненциальный множитель для расчета проницаемости, моль/(м_{ТВ}·с·МПа^{0,5}); E_Φ — энергия активации проницаемости, кДж/моль; R — универсальная газовая постоянная ($R = 0,008314$ кДж/(моль·К)); T — температура, К.

Протяженность участка трубопровода l равна 10 м, внешний радиус r_o — 213 мм, толщина стенки трубопровода h — 7 мм. Условия перекачки по трубопроводу, применимые на производстве по получению водорода, следующие: давление перекачиваемого водорода $P_1 = 1,2$ МПа; мощность трубопровода $q = 100$ тыс. м³/год; температура перекачиваемого водорода — 300, 400, 500 и 600 К.

Согласно первому закону Фика, диффузионный поток можно описать уравнением [28]

$$J = -D \frac{dc}{dx}, \tag{2}$$

где c — концентрация водорода на поверхностях материала, мольН₂/м³_{МАТ}; x — координата по толщине материала h , м; D — коэффициент диффузии, м²/с, описываемый по закону Аррениуса

$$D = D_0 \cdot \exp(-E_a/RT), \quad (3)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель для расчета коэффициента диффузии, m^2/c ; E_a — энергия активации диффузии, кДж/моль.

При рассмотрении диффузионного потока через стенку трубы уравнение (2) примет вид:

$$J = -D \frac{dc}{dr}, \quad (4)$$

где r — координата по толщине стенки трубы h , м.

При этом дифференциальное уравнение для цилиндрических объектов имеет вид [29]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \right], \quad (5)$$

где t — координата времени, с.

Для стационарных режимов диффузии уравнение (5)

$$0 = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \right]. \quad (6)$$

Рассматривая цилиндрический объект как трубопровод, обладающий внутренним радиусом r_i и внешним радиусом $r_o = r_i + h$, уравнение (6) имеет следующее решение:

$$c = \frac{(c_2 - c_1) \cdot (\ln(r) - \ln(r_o))}{\ln(r_o) - \ln(r_i)} + c_2, \quad (7)$$

где c_1 и c_2 — концентрация водорода на внутренней и внешней стенке трубопровода соответственно, моль/ m^3 .

Для определения уравнения диффузионного потока J важно учесть, что диффузия газов в металле может быть ограничена скоростью рекомбинации атомов на поверхности (SLR) или непосредственно скоростью диффузии водорода (DLR) [30]. Учитывая, что режим SLR справедлив для невысоких давлений [31], далее будет рассмотрен расчет исходя из расчетной модели для DLR [31, 32]. Объединяя уравнения (4) и (7) получаем выражение

$$J = D \cdot \frac{(c_1 - c_2)}{(\ln(r_o) - \ln(r_i)) \cdot r}. \quad (8)$$

Согласно закону Сивертса, концентрацию c можно определить по формуле

$$c = S \cdot \sqrt{P}, \quad (9)$$

где P — давление водорода, МПа; S — растворимость водорода в металле, моль/($m^3_{TB} \cdot MPa^{0,5}$), (1), определяемый по закону Аррениуса:

$$S = S_0 \cdot \exp(-E_s/RT), \quad (10)$$

где S_0 — предэкспоненциальный множитель для расчета растворимости, моль/($m^3_{TB} \cdot MPa^{0,5}$); E_s — энергия активации растворения, кДж/моль.

С учетом того, что газ в реальных условиях ведет себя неидеально, вместо давления водорода на практике [33] применяют уравнение (9):

$$c = S \cdot \sqrt{f}, \quad (11)$$

где f — летучесть газа, МПа:

$$f = P \cdot \exp(b \cdot P/RT), \quad (12)$$

где b — постоянная, $cm^3/моль$ (при давлении до 50 МПа и температуре до 1000 К для водорода $b = 15,84 cm^3/моль$ [34]).

Так как парциальное давление водорода в атмосфере имеет очень малые значения, концентрацию c_2 в уравнении (8) можно не учитывать. Тогда выражение имеет вид

$$J = D \cdot S \cdot \frac{\sqrt{f_1}}{(\ln(r_o) - \ln(r_i)) \cdot r}, \quad (13)$$

где f_1 — летучесть водорода внутри трубы, МПа.

Учитывая, что $\Phi = D \cdot S$ [35]:

$$J = \Phi \cdot \frac{\sqrt{f_1}}{(\ln(r_o) - \ln(r_i)) \cdot r}. \quad (14)$$

Скорость утечки водорода Q (л/с) через стенку трубы при стационарном режиме возможно определить по формуле

$$Q_{CT} = J \cdot F \cdot V_M, \quad (15)$$

где F — площадь внутренней поверхности трубы, m^2 (для труб $F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$, где l — длина участка трубы, м); V_M — молярный объем газа (л/моль), изменяемый в зависимости от давления и температуры для одинакового количества газа л:

$$V_M = V_M(n.u.) \cdot \frac{P_1 \cdot T(n.u.)}{T \cdot P(n.u.)}, \quad (16)$$

где $V_M(n.u.)$ — молярный объем газа при нормальных условиях (22,4 л/моль); $T(n.u.)$ — температура при нормальных условиях (273,15 К); $P(n.u.)$ — давление при нормальных условиях (0,101325 МПа).

Объединяя уравнение (15) и (16), можно оценить потери водорода в трубопроводе за секунду.

Результаты исследования и обсуждение

По формулам (12), (15) и (16) выполнен расчет потерь водорода в трубопроводе, согласно принятым в статье данным (табл. 3). Расчетные потери водорода в трубопроводе, произведенном из различных марок стали, при разных температурах перекачиваемой среды представлены на рис. 1.

Видно, что значения потерь при температуре 300 К незначительны и составляют в год около 1 мл H_2 . С повышением температуры перекачиваемой среды потери значительно возрастают: при температурах 500 К и 600 К значения потерь достигают десятков и сотен литров в год. При этом наибольшие потери при всех температурах отмечены для стали 310 (максимум ~903 л/год при температуре 600 К), а наименьшие — в низкоуглеродистой стали 304 (максимум ~69 л/год при температуре 600 К). Для остальных сталей средний объем потерь составляет ~250 л/год, т. е. $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ % общего объема перекачки. Полученные значения объема потерь согласуются с результатами других исследований (10^{-5} – $5 \cdot 10^{-4}$ %) [36, 37].

Следует отметить, что на объем утечек водорода, кроме эксплуатационных характеристик (например, температуры и давления среды), существенно влияет и химический состав стали. Согласно анализу данных на рис. 2, проницаемость водорода снижается при уменьшении содержания в стали углерода, серы и фосфора, что хорошо видно на примере сталей: 304 (0,062 % C; 0,022 % S; 0,035 % P; $Q_{600K} \sim 279$ л/год); 321 (0,053 % C; 0,01 % S; 0,032 % P; $Q_{600K} \sim 226$ л/год); 304L (0,033 % C; 0,015 % S; 0,013 % P; $Q_{600K} \sim 69$ л/год); 316 (0,077 % C; $Q_{600K} \sim 211$ л/год) и 316L (0,025 % C; $Q_{600K} \sim 128$ л/год). При этом добавление в сталь

Таблица 3

Значение потерь водорода Q в трубопроводе, выполненном из различных марок аустенитных коррозионностойких сталей, л/год

Марка стали	Температура, К			
	300	400	500	600
304	$2,80 \cdot 10^{-4}$	0,36	19,05	279,19
304L	$2,17 \cdot 10^{-5}$	0,04	3,31	68,99
310	$5,38 \cdot 10^{-3}$	2,08	77,91	902,45
316	$5,52 \cdot 10^{-4}$	0,32	15,48	211,47
316L	$1,71 \cdot 10^{-4}$	0,14	8,19	127,95
316LN	$6,78 \cdot 10^{-4}$	0,39	18,93	258,42
321	$3,94 \cdot 10^{-4}$	0,28	15,28	226,43
21-6-9	$7,17 \cdot 10^{-4}$	0,44	22,16	310,25
21-9-9	$5,39 \cdot 10^{-4}$	0,37	19,56	285,12

азота ухудшает ее стойкость к проникновению водорода: 316L ($Q_{600K} = 127,95$ л/год) и 316LN ($N = 0,23\%$, $Q_{600K} \sim 258$ л/год). Согласно работе [38], содержание углерода, азота, серы и фосфора в аустенитных сталях должно быть минимальным и соответствовать соотношению $(C + N) < 0,25\%$ и $(S + P) < 0,04\%$, что отражено в приведенных примерах сравнения сталей. Ограничение содержания углерода, азота и вредных примесей обеспечивает снижение структурной неоднородности в металле, повышает энергию активации диффузионных процессов атомов водорода, т. е. снижает диффузионную подвижность атомов водорода в кристаллической решетке аустенитной стали, а также повышает работу зарождения и развития дислокационных и межзеренных хрупких трещин при коррозионном и водородном растрескивании в условиях статического и динамического нагружений.

Наличие повышенного по сравнению со сталью 304L содержания хрома и марганца в сталях 21-6-9 и 21-9-9 препятствует дополнительному снижению проницаемости водорода через сталь (200–300 л/год). Кроме того, в стали 310, содержащей максимальные значения хрома и никеля в составе (25,14 и 19,32 % соответственно) с пониженным содержанием железа (53 %), отмечен самый большой объем потерь водорода (~902 л/год). Вероятно, при превышении определенного уровня концентрации легирующих атомов эффект повышения стойкости к проникновению водорода ослабевает, что описано в работе [38], где добавление хрома в состав стали дает ощутимый эффект только до его концентрации ~18 %. Поэтому содержание Cr, Ni и других легирующих элементов должно быть минимально необходимым для обеспечения аустенитной структуры стали и ее структурной стабильности при температурах эксплуатации.

Перечисленные ограничения по составу аустенитной стали приводят к более равномерному распределению в ней легирующих элементов и неметаллических включений, тоньше и чище становятся границы зерен, увеличивается прочность межкристаллитной связи, что в целом обеспечивает значительное снижение водородопроницаемости как основного металла, так и сварных соединений.

Таким образом, исходя из полученных данных, наиболее оптимальный состав среди рассмотренных в работе сталей имеет сталь 304L, %: 9,5 Ni; 18 Cr; 0,7 Mn; 0,3 Si; 0,033 C; 0,013 P и 0,015 S.

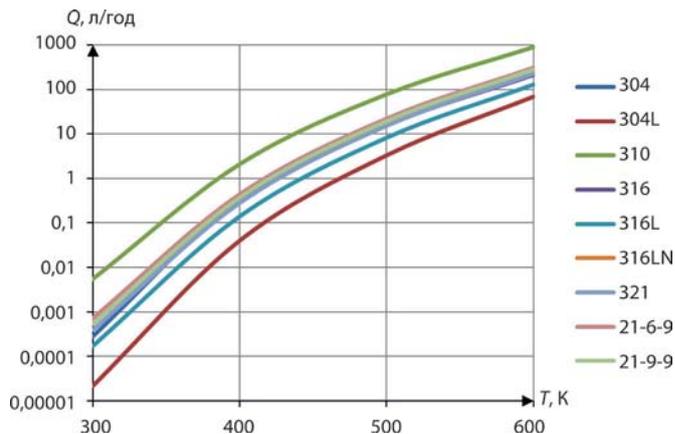


Рис. 1. Зависимость потерь водорода от температуры для различных марок стали

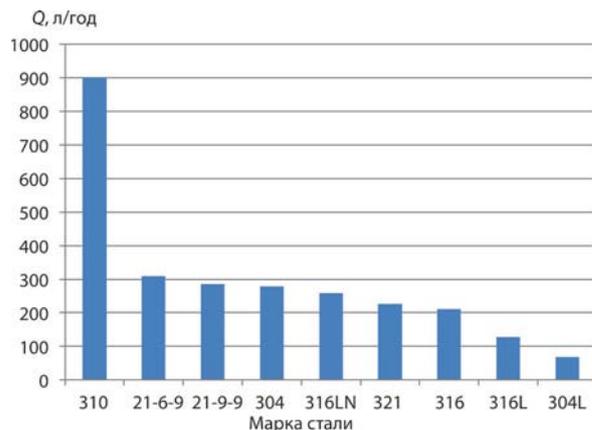


Рис. 2. Потери водорода в трубопроводе из различных марок аустенитных сталей при температуре 600 К

Выводы

1. В ходе литературного анализа и проведения математических преобразований предложена методика оценки эффективности конструкционного материала трубопровода с целью снижения потерь водорода за счет его диффузии через стенку.
2. Установлено, что наибольшие потери водорода наблюдаются в трубопроводе, выполненном из стали 310 (903 л/год при температуре 600 К), а наименьшие — в стали 304L (максимум ~69 л/год при температуре 600 К). В среднем объем потерь для остальных сталей варьируется в диапазоне ~200–300 л/год.
3. Выявлено, что с понижением содержания углерода, фосфора, серы и азота снижается проницаемость водорода в стали. Увеличение концентрации хрома, никеля и марганца выше уровня стали 304L не повышает стойкость стали к проникновению водорода.
4. Перечисленные ограничения по составу аустенитной стали приводят к более равномерному распределению в ней легирующих элементов и неметаллических включений, тоньше и чище становятся границы зерен, увеличивается прочность межкристаллитной связи, что в целом обеспечивает значительное снижение водородопроницаемости как основного металла, так и сварных соединений.



Библиографический список

См. англ. блок

“*Chernye metally*”, 2024, No. 9, pp. 50–54
DOI: 10.17580/chm.2024.09.08

Analysis of the efficiency of reducing hydrogen losses in a pipeline made of various austenitic stainless steels

Information about authors

A. P. Petkova, Dr. Eng., Prof., Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹,
e-mail: apetkova@inbox.ru;

V. A. Zlotin, Postgraduate Student, Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹,
e-mail: zlotinvladimir@mail.ru

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract: In order to reduce emissions of carbon dioxide into the atmosphere, which is formed as a result of production petroleum products use, it is proposed to use hydrogen as an environmentally friendly energy resource. At the same time, hydrogen has a high permeability through materials, which leads to its inevitable diffusion losses through the pipeline wall during hydrogen transportation and storage. Based on the literature data and mathematical transformations, a computational model was proposed to estimate hydrogen leakage during transportation by a pipeline at a pressure up to 1.2 MPa and at a temperature from 300 to 600 K. Using tabular literature data on permeability coefficients based on the calculation model, possible losses of hydrogen during its transportation through a pipeline made of different grades of austenitic corrosion-resistant steels (304, 304L, 310, 316, 316L, 316LN, 321, 21-6-9, 21-9-9) at temperatures from 300 to 600 K were determined. Based on the results of calculations, it was concluded that 304L steel is the most effective material for reducing hydrogen permeability (maximum losses ~69 l/year at a temperature of 600 K). At the same time, the largest losses of hydrogen are observed in a pipeline made of steel 310 (903 l/year at a temperature of 600 K). In other steels, the volume of losses varies in the range of ~200-300 l/year. The analysis of the steel compositions showed that a decrease in the concentration of carbon, nitrogen, sulfur and phosphorus leads to an increase in its resistance to hydrogen penetration.

Key words: compressed hydrogen, pipeline, permeability, diffusion, losses, austenitic steels, transportation.

References

1. Zhdanev O. V. Ensuring technological sovereignty of the fuel and energy complex industries of the Russian Federation. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 258. pp. 1061–1070. DOI: 10.31897/PMI.2022.107.
2. Shammazov I. A., Borisov A. V., Nikitina V. S. Modeling the operation of gravity sections of an oil pipeline. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2024. No. 1. pp. 74–80. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-1-74-80.
3. Bakhtizin R. N., Zaripov R. M., Korobkov G. E., Masalimov R. B. Evaluation of the influence of internal pressure causing additional bending of the pipeline. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020. Vol. 242. pp. 160. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.160.
4. Fetisov V., Gonopolsky A. M., Davardoost H. et al. Regulation and impact of VOC and CO₂ emissions on low-carbon energy systems resilient to climate change: A case study on an environmental issue in the oil and gas industry. *Energy Science & Engineering*. 2023. Vol. 11, Iss. 4. pp. 1516–1535. DOI: 10.1002/ese3.1383.
5. Korshak A. A., Korshak A. A., Pshenin V. V. Calculation of phase transitions in condensation units for recovery of oil and oil products vapors (Russian). *Oil Industry Journal*. 2021. Vol. 2021, Iss. 06. pp. 98–101. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-98-101.
6. Pshenin V. V., Zakirova G. S. Improving the efficiency of oil vapor recovery systems during commodity-transport operations at oil terminals. *Zapiski Gornogo instituta*. 2023. Vol. 265. pp. 121–128. DOI: 10.31897/PMI.2023.29.
7. Zagashvili Y., Kuzmin A., Buslaev G. et al. Small-scaled production of blue hydrogen with reduced carbon footprint. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 16. pp. 5194. DOI: 10.3390/en14165194.
8. Kopteva A., Kalimullin L., Tsvetkov P., Soares A. Prospects and obstacles for green hydrogen production in Russia. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 3. pp. 718. DOI: 10.3390/en14030718.
9. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Dvoynikov M. V., Buslaev G. V. Barriers to the implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable development of global energy. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020. Vol. 244. pp. 428–438. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.5.
10. Bazhenov S., Dobrovolsky Y., Maximov A., Zhdanev O. V. Key challenges for the development of the hydrogen industry in the Russian Federation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 54. 102867. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102867.
11. Nastich S. V., Lopatkin V. A. Effect of hydrogen gas on mechanical properties of pipe metal of main gas pipelines. *Metallurgist*. 2022. Vol. 66, Iss. 5-6. pp. 625–638. DOI: 10.1007/s11015-022-01369-0.
12. Zhou C. et al. Effects of internal hydrogen and surface-absorbed hydrogen on the hydrogen embrittlement of X80 pipeline steel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, Iss. 40. pp. 22547–22558. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.239.
13. Alekseeva O. K., Kozlov S. I., Fateev V. N. Hydrogen transportation. *Transport na alternativnom toplive*. 2011. No. 3 (21). pp. 18–24.
14. Klopčič N., Stöhr T., Grimmer I., Sartory M. et al. Refurbishment of natural gas pipelines towards 100 % hydrogen — a thermodynamic-based analysis. *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 24. 9370. DOI: 10.3390/en15249370.

15. Lu H. T., Li W., Miandoab E. S., Kanehashi S. et al. The opportunity of membrane technology for hydrogen purification in the power to hydrogen (P2H) roadmap: A review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2021. Vol. 15. Iss. 3. pp. 464–482. DOI: 10.1007/s11705-020-1983-0.
16. Pryakhin E. I., Pribytkova D. A. The influence of the quality of surface preparation of pipes for heating networks on their corrosion resistance during operation in underground conditions. *Chernye Metally*. 2023. No. 11. pp. 97–102.
17. Pryakhin E. I., Azarov V. A. Increasing the adhesion of fluoroplastic coatings to steel surfaces of pipes with a view to their use in gas transmission systems. *Chernye Metally*. 2024. No. 3. pp. 69–75.
18. Nemanič V. Hydrogen permeation barriers: Basic requirements, materials selection, deposition methods, and quality evaluation. *Nuclear Materials and Energy*. 2019. Vol. 19. pp. 451–457. DOI: 10.1016/j.nme.2019.04.001.
19. Lei Y., Hosseini E., Liu L., Scholes C. A. et al. Internal polymeric coating materials for preventing pipeline hydrogen embrittlement and a theoretical model of hydrogen diffusion through coated steel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, Iss. 73. pp. 31409–31419. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.034.
20. Weihrach M., Patel M., Patterson E. A. Measurements and predictions of diffusible hydrogen escape and absorption in cathodically charged 316LN austenitic stainless steel. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, Iss. 1. 10545. DOI: 10.1038/s41598-023-37371-y.
21. Yang W. W. et al. Review on developments of catalytic system for methanol steam reforming from the perspective of energy-mass conversion. *Fuel*. 2023. Vol. 345. 128234. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128234.
22. Zagashvili Yu. V., Kuzmin A. M. Small-scale hydrogen production plant. Patent RF, No. 184920. Applied: 29.06.2018. Published: 14.11.2018.
23. Xiukui S., Jian X., Yiyl L. Hydrogen permeation behaviour in austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*. 1989. Vol. 114. pp. 179–187. DOI: 10.1016/0921-5093(89)90857-5.
24. Gorman J. K., Nardella W. R. Hydrogen permeation through metals. *Vacuum*. 1962. Vol. 12, Iss. 1. pp. 19–24. DOI: 10.1016/0042-207X(62)90821-7.
25. Quick N. R., Johnson H. H. Permeation and diffusion of hydrogen and deuterium in 310 stainless steel, 472 K to 779 K. *Metallurgical Transactions A*. 1979. Vol. 10. pp. 67–70. DOI: 10.1007/BF02686408.
26. Hashimoto E., Kino T. Hydrogen permeation through type 316 stainless steels and ferritic steel for a fusion reactor. *Journal of nuclear materials*. 1985. Vol. 133. pp. 289–291. DOI: 10.1016/0022-3115(85)90153-9.
27. Forcey K. S. et al. Hydrogen transport and solubility in 316L and 1.4914 steels for fusion reactor applications. *Journal of Nuclear Materials*. 1988. Vol. 160. Iss. 2-3. pp. 117–124. DOI: 10.1016/0022-3115%2888%2990038-4.
28. Nagumo M. Fundamentals of hydrogen embrittlement. Singapore: Springer, 2016. 921 p.
29. Ngameni R., Millet P. Derivation of the diffusion impedance of multi-layer cylinders. Application to the electrochemical permeation of hydrogen through Pd and PdAg hollow cylinders. *Electrochimica Acta*. 2014. Vol. 131. pp. 52–59. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.01.076.
30. Pisarev A. A., Tsvetkov I. V., Marenkov E. D., Yarko S. S. Hydrogen permeability through metals. *Proceedings of the Fifth International Conference and the Ninth International School of Young Scientists and Specialists named after A. A. Kurdyumov*. 2014. Vol. 1. pp. 155–176.
31. Li Y., Barzagli F., Liu P. et al. Mechanism and evaluation of hydrogen permeation barriers: a critical review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023. Vol. 62, Iss. 39. pp. 15752–15773. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c02259.
32. Engels J., Houben A., Linsmeier C. Hydrogen isotope permeation through yttria coatings on Eurofer in the diffusion limited regime // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, Iss. 24. pp. 13142–13149. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.072.
33. Zafra A. et al. Hydrogen-assisted fatigue crack growth: pre-charging vs in-situ testing in gaseous environments. *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 871. 144885. DOI: 10.31224/2994.
34. San Marchi C., Somerday B. P., Robinson S. L. Permeability, solubility and diffusivity of hydrogen isotopes in stainless steels at high gas pressures. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007. Vol. 32. No. 1. pp. 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.008>
35. Wetegrove M., Jazmin Duarte M., Taube K., et al. Preventing hydrogen embrittlement: the role of barrier coatings for the hydrogen economy. *Hydrogen*. 2023. Vol. 4, Iss. 2. pp. 307-322. DOI: 10.3390/hydrogen4020022.
36. Tian X., Pei J. Study progress on the pipeline transportation safety of hydrogen-blended natural gas. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, Iss. 11. e21454. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21454.
37. Bolobov V. I. et al. Estimation of the influence of compressed hydrogen on the mechanical properties of pipeline steels. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 19. 6085. DOI: 10.3390/en14196085.
38. Ganzulenko O. Yu., Kirillov N. B., Petkova A. P., Yakovitskaya M. V. Hydrogen permeability and performance of austenitic steels and alloys in hydrogen-containing environments. *Materialovedenie. Energetika*. 2011. No. 2 (123). pp. 218–224.