



УДК 621.791:621.643.1/2

## ПОВЕДЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ РЕМОНТНОЙ СВАРКЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **О. И. ОЛЕЙНИК**, инж., **А. П. ПАЛЬЦЕВИЧ**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализирована возможность поступления диффузионного водорода из транспортируемого по газопроводу углекислого газа при проведении ремонтной сварки на действующем трубопроводе. Показано, что при парциальном давлении диффузионного водорода вблизи внутренней поверхности стальной трубы в пределах 0,10...0,75 МПа при остаточной толщине стенки в зоне дефекта выше 5 мм повышение параметра риска образования водородных (холодных) трещин не превышает 5...11 %. Приведены значения экспериментальных измерений потока диффузионного водорода через стенку трубы на действующих трубопроводах.

*Ключевые слова:* дуговая ремонтная сварка, действующие газопроводы, диффузионный водород, стенка газопровода, водородные трещины, риск образования

При ремонтной сварке магистральных газопроводов на жестких режимах (низкой погонной энергии) характерной проблемой является риск появления холодных (водородных) трещин, на образование которых существенное влияние оказывает диффузионный водород в металле сварного соединения. Использование присадочного материала с низким содержанием потенциального водорода в сочетании с надежной защитой сварочной ванны от окружающей среды позволяет существенно снизить содержание диффузионного водорода в зоне термического влияния (ЗТВ). Однако остается еще один источник диффузионного водорода — транспортируемый в трубопроводе природный газ, в котором водород содержится в виде химических соединений (метан, пропан, этан, бутан) либо в молекулярном виде  $H_2$  и не диффундирует в металл стенки трубопровода. Однако в зависимости от давления и температуры природный газ может находиться в двухфазном состоянии, т. е. наряду с газовой фазой существует еще жидкая. На рис. 1 приведена диаграмма двухфазного состояния природного газа, из которой следует, что при рабочих давлениях около 7,5 МПа и температурах 40...50 °C жидкая фаза составляет примерно 20 % объема смеси. В жидкой фазе свободный водород может растворяться в атомарном виде. Учитывая высокую степень турбулизации газа в магистральном газопроводе, более высокую плотность жидкой фазы и более низкую температуру по сечению трубы у ее стенок, можно считать, что жидкая фаза концентрируется у стенок трубы и соответственно из жидкой фазы растворенный атомарный водород диффундирует в металл стенки трубы. В стационарных условиях транспорта природного газа по-

ток водорода  $J$  через стенку можно представить в виде [1]

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial r} \quad (\text{мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})), \quad (1)$$

где  $D$  — средний коэффициент диффузии водорода через металл стенки трубы;  $C(r)$  — концентрация диффузионного водорода по толщине стенки трубы (координата  $r$ ).

При стационарном потоке и малых толщинах стенки

$$J \approx \frac{C(R_H) - C(R_B)}{\delta} D, \quad (2)$$

где  $C(R_H)$  — концентрация водорода на наружной поверхности  $r = R_H$ ;  $C(R_B)$  — то же на внутренней поверхности трубы  $r = R_B$ .

Полагая, что  $C(R_H) \approx 0$ , а  $C(R_B) \approx \sqrt{P_{H_2}} K(T)$  по закону Сиверта, где  $P_{H_2}$  — парциальное давление водорода на поверхности  $r = R_B$ , ата;  $K(T)$

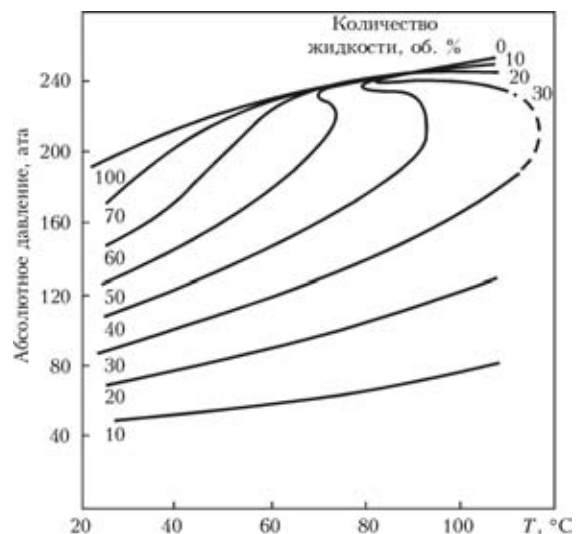


Рис. 1. Диаграмма фазового состояния, характерная для природной углеводородной смеси

© В. И. Махненко, О. И. Олейник, А. П. Пальцевич, 2011



Таблица 1. Расчетные значения  $J\delta$  в зависимости от  $T$  и  $P_H$

$T, ^\circ\text{C}$	$D \cdot 10^6, \text{см}^2/\text{с}$	$K, \text{мл}/(100 \text{ г} \cdot \text{ата}^{1/2})$	$J\delta \cdot 10^3, \text{мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч}), \text{ при } P_H, \text{ ата}$				
			1	4	6	8	10
20	0,20	1,9	0,1069	0,214	0,262	0,302	0,338
40	0,46	1,8	0,2320	0,464	0,570	0,659	0,736
60	0,98	1,7	0,4680	0,938	1,147	1,325	1,482

— растворимость водорода в металле стенки трубы при температуре  $T$  (рис. 2),  $\text{см}^3/(100 \text{ г} \cdot \text{ата}^{1/2})$ , получаем

$$C(R_B) = J \frac{\delta}{D(T)} \quad (\text{мл}/100 \text{ г}) \quad (3)$$

или в более часто употребляемой размерности

$$\bar{C}(R_B) = J \frac{\delta}{D(T)} \frac{100 \text{ г}}{\gamma} \quad (\text{мл}/100 \text{ г}),$$

где  $\gamma$  — удельный вес стали стенки трубы ( $7,8 \text{ г}/\text{см}^3$ ).

Из данных на рис. 2 (закон Сивертса) следует, что при одном и том же парциальном давлении водорода  $P_H$  за счет увеличения температуры металла при ремонтной сварке концентрация водорода  $C(R_B)$  может значительно возрасти на внутренней поверхности трубы и, следовательно, по толщине стенки. Естественно, это справедливо при условии, что  $P_H$  остается неизменным, т. е. конвективный подвод водорода в пристеночной области достаточно быстро компенсирует его диффузионный отвод в стенку трубы.

Используя данные из [2, 3] относительно величины  $D$  при температуре  $T$  стенки трубы в виде

$$D(T) = 0,12 \exp\left(-\frac{3900}{T+273}\right), \quad T < 200 \text{ } ^\circ\text{C},$$

получим из (1)–(3) с учетом данных рис. 2 при  $20 \leq T \leq 80 \text{ } ^\circ\text{C}$  зависимость от  $P_H$  величины  $J\delta \cdot 3600, \text{ мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$  (табл. 1), где

$$J\delta = K \sqrt{P_H} D \frac{\gamma}{100} \cdot 3600 \quad (\text{мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})). \quad (4)$$

Из данных табл. 1 видно, что при  $\delta = 1 \text{ см}$

величина потока водорода  $J$  с площади  $1 \text{ см}^2/\text{ч}$  существенно зависит от температуры стенки, и при  $T = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $P_H = 1,0 \text{ ата}$  не превышает  $0,232 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ , а при  $P_H = 10 \text{ ата}$  она не превышает  $0,736 \cdot 10^{-3} \text{ мл}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ , т. е. нужна достаточно чувствительная аппаратура для регистрации таких потоков и соответственно определения величин  $P_H$  и  $C(R_B)$ , особенно в пределах  $P_H < 5 \text{ ата}$  и  $T < 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

В общем объеме перекачиваемого газа эти потери через стенку трубы  $1420 \times 20 \text{ мм}$  при давлении  $P = 75 \text{ ата}$ ,  $P_H = 8 \text{ ата}$  и скорости транспортировки  $v = 10 \text{ м}/\text{с} = 36000 \text{ м}/\text{ч}$  составляют ( $T = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) всего лишь  $0,25 \cdot 10^{-10} \%$ , т. е. поставщиков газа мало интересуют.

В этой связи задачей данной работы является привлечение внимания исследователей к проблеме наводороживания стенки трубопровода за счет потока диффузионного водорода из транспортируемых углеводородов. Отметим, что в зарубежной литературе этот вопрос также обсуждается достаточно активно [4 и др.]. Поэтому в данной работе рассмотрено влияние  $P_H$  на распределение диффузионного водорода при сварочном нагреве в зоне утонения стенки трубы в зависимости от ее толщины в районе сварочного нагрева при выполнении первого прохода дуговой сваркой на режиме  $I = 90 \text{ А}$ ,  $U = 24 \text{ В}$ ,  $v_{\text{св}} = 0,2 \text{ см}/\text{с}$ . Материал трубы — сталь типа 17Г1С.

Распределение водорода следует рассматривать с учетом распределения микроструктуры металла и его напряженного состояния в зоне соединения при сварочном нагреве. Высокий уровень напряжений при рассматриваемой ремонтной сварке под давлением в металле ЗТВ достаточно очевиден, а что касается микроструктурных изменений, то их распределение имеет достаточно локальный характер и требует соответствующей увязки с распределением диффузионного водорода.

При расчетах использовали разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины компьютерную систему «ArcWeldSys» [1, 3], с помощью которой для среднего сечения вдоль наплавленного прохода  $z = \text{const}$  в плоскости  $x, y$  путем последовательного прослеживания во времени  $t$  (начиная с момента  $t = 0$ ) прохождения дугой данного сечения определяли температурное поле  $T(x, y,$

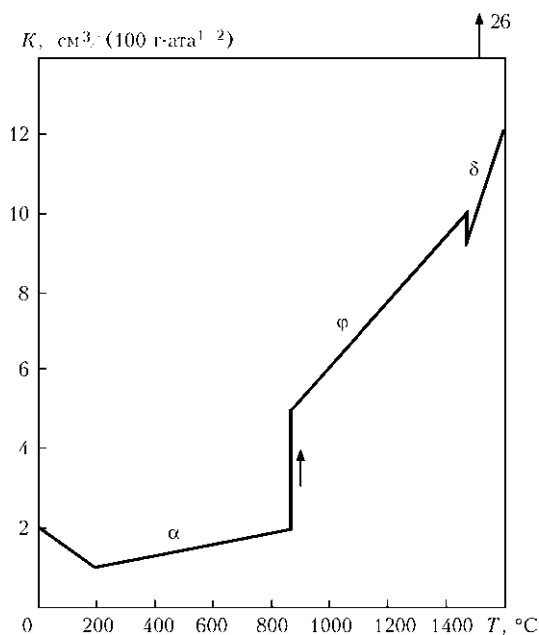


Рис. 2. Влияние температуры на растворимость водорода  $K$  в железе

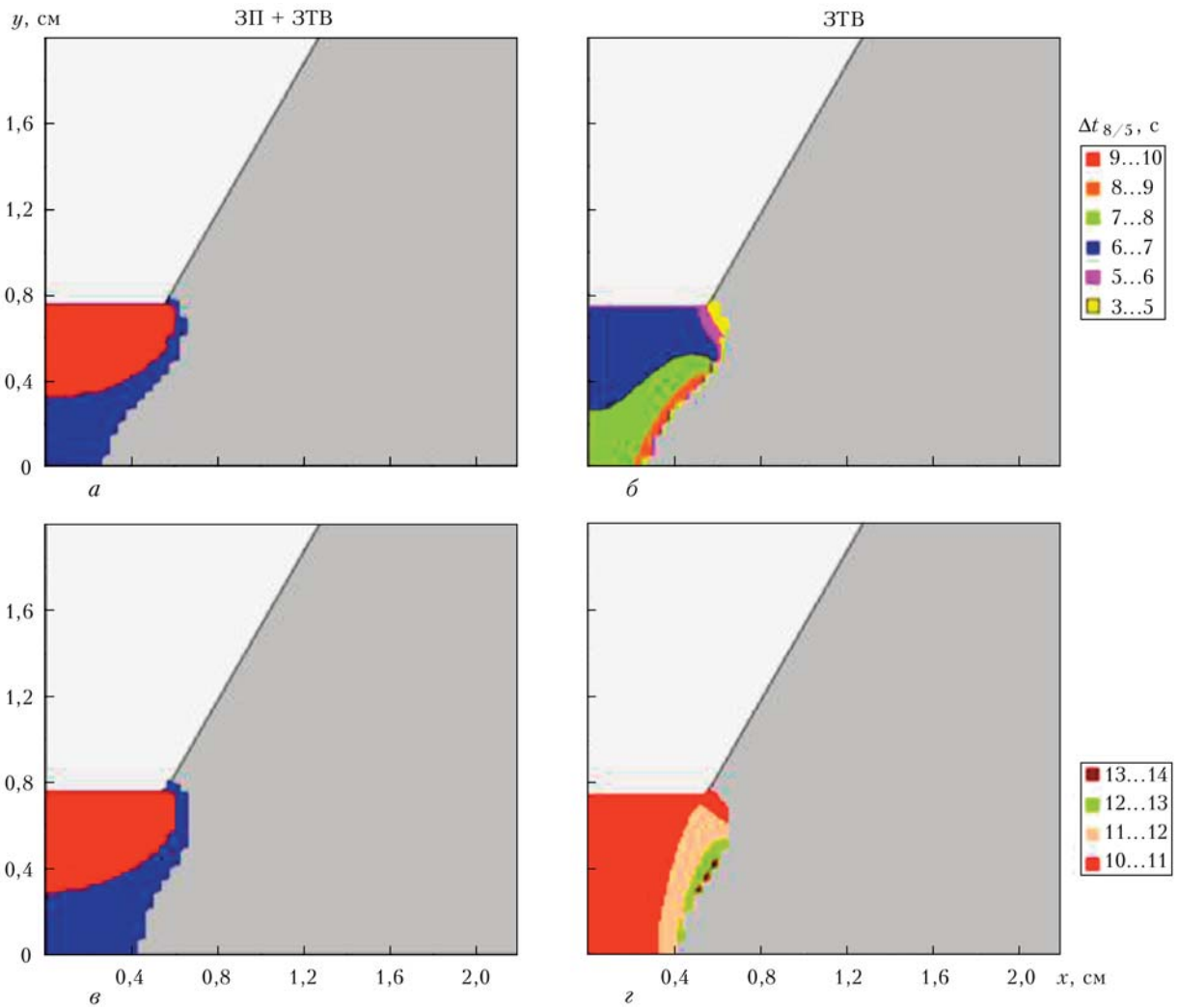


Рис. 3. Результаты расчета размеров ЗП и ЗТВ (а),  $\Delta t_{8/5}$  (б) для первого прохода дуговой заварки канавочного дефекта вдоль окружности трубы при  $\delta_{\min} = 5$  мм,  $P_H = 7,5$  ата и скорости газа в трубе 6 м/с (без подогрева) и то же, но при подогреве 150 °С (в, г)

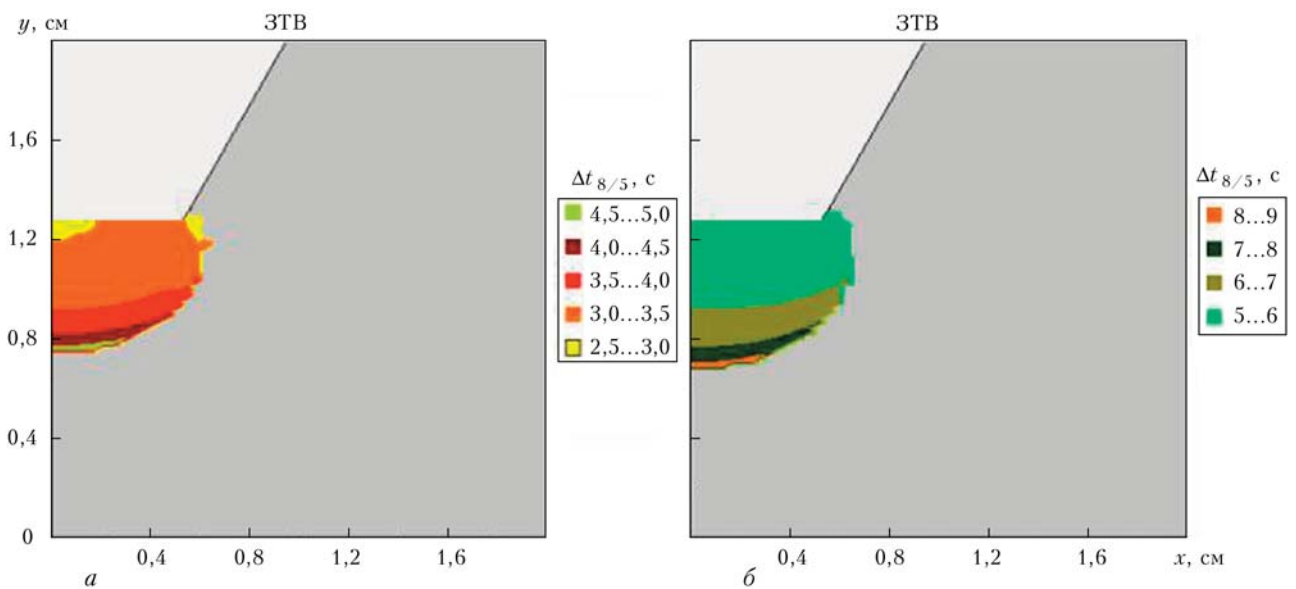


Рис. 4. Время пребывания металла ЗТВ при охлаждении  $\Delta t_{8/5}$  для зоны толщиной  $\delta_{\min} = 10$  мм,  $T_0 = 20$  (а), 150 °С (б)

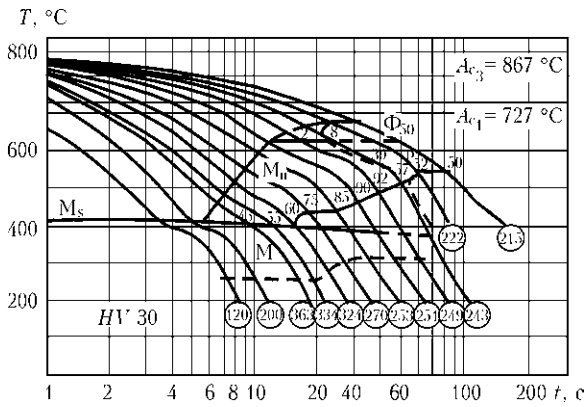


Рис. 5. Диаграмма АРА для стали типа 17Г1С

z); зону плавления (ЗП) основного металла, характеризующуюся изотермами максимальных температур  $T_{max}(x, y) = T_L$ ,  $T_{max}(x, y) = T_S$ , где  $T_L$ ,  $T_S$  — соответственно температуры ликвидуса (около 1490 °C) и солидуса (около 1420 °C); зону микроструктурных изменений, характеризующуюся изотермой  $T_{max}(x, y) = 800$  °C. В зоне ЗТВ вычисляли  $\Delta t_{8/5}$  — время пребывания металла ЗП и ЗТВ в интервале температур 800...500 °C при охлаждении. На рис. 3 приведены расчетные данные, связанные с нагревом в зоне с минимальной толщиной металла  $\delta_{min} = 5$  мм без предварительного

Таблица 2. Величины  $\Delta t_{8/5}$  и объемная доля составляющих микроструктуры в металле ЗТВ для четырех вариантов

Параметр	Вариант			
	1 (рис. 3, а, б)	2 (рис. 3, в, з)	3 (рис. 4, а)	4 (рис. 4, б)
$\Delta t_{8/5}$ , с	7...8	11...12	4...5	6...8
$V_M$ , об. %	35...40	25...30	55...60	50...40
$V_B$ , об. %	65...60	75...70	45...40	50...60

подогрева, т. е.  $T_0 = 20$  °C и с подогревом до  $T_0 = 150$  °C. Учитывали скорость движения газа в трубе на уровне 6 м/с и соответственно коэффициент теплообмена на внутренней поверхности [5], равный 0,05 Дж/(см<sup>2</sup>·с·°C). На рис. 4 приведены расчетные данные  $\Delta t_{8/5}$  для зоны с минимальной толщиной  $\delta_{min} = 10$  мм без предварительного подогрева и с подогревом до  $T_0 = 150$  °C.

В табл. 2 приведены расчетные данные  $\Delta t_{8/5}$  для четырех вариантов, которые в сочетании с диаграммой АРА [6] для стали 17Г1С на рис. 5 позволяют судить о количестве мартенсита  $V_M$  и бейнита  $V_B$  в микроструктуре металла ЗТВ при охлаждении. Эти данные показывают, что микроструктурное состояние в зоне сварочного на-

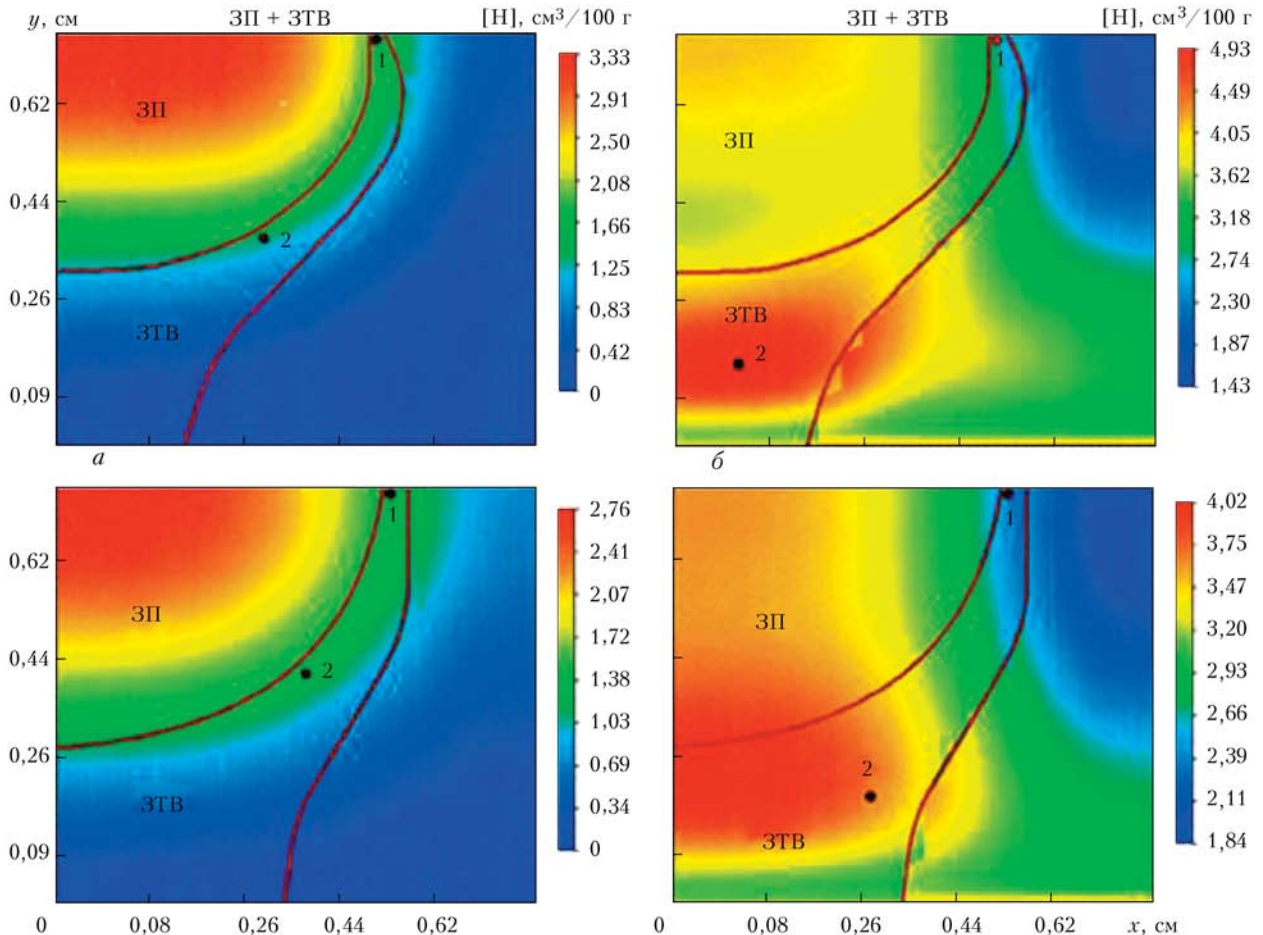


Рис. 6. Распределение диффузионного водорода в поперечном сечении первого прохода при  $\delta_{min} = 5$  мм в момент времени  $t = 98$  с при  $P_{H_2} = 0$  (а, в) и  $P_{H_2} = 7,5$  ата (б, з) при  $T_0 = 20$  (а, б) и 150 °C (в, з) в ЗП и ЗТВ



рева рассматриваемой стали при ремонтной сварке является достаточно благоприятным с позиций образования холодных трещин при наличии соответствующего содержания диффузионного водорода в металле ЗТВ (условие высоких растягивающих напряжений при рассматриваемой ремонтной сварке под давлением всегда соблюдается). Расчетные данные приведены ниже.

На рис. 6–9 приведена кинетика изменения во времени  $t$  концентрации водорода в поперечном сечении шва для двух толщин стенки трубы в зоне дефектов (сварки) при  $P_{H_2} = 0$  и  $P_{H_2} = 7,5$  ата при содержании его в наплавленном металле  $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Видно, что при рассматриваемом сварочном нагреве в зоне малых толщин стенки трубы (см. рис. 6, а, б) и интенсивном восстановлении парциального давле-

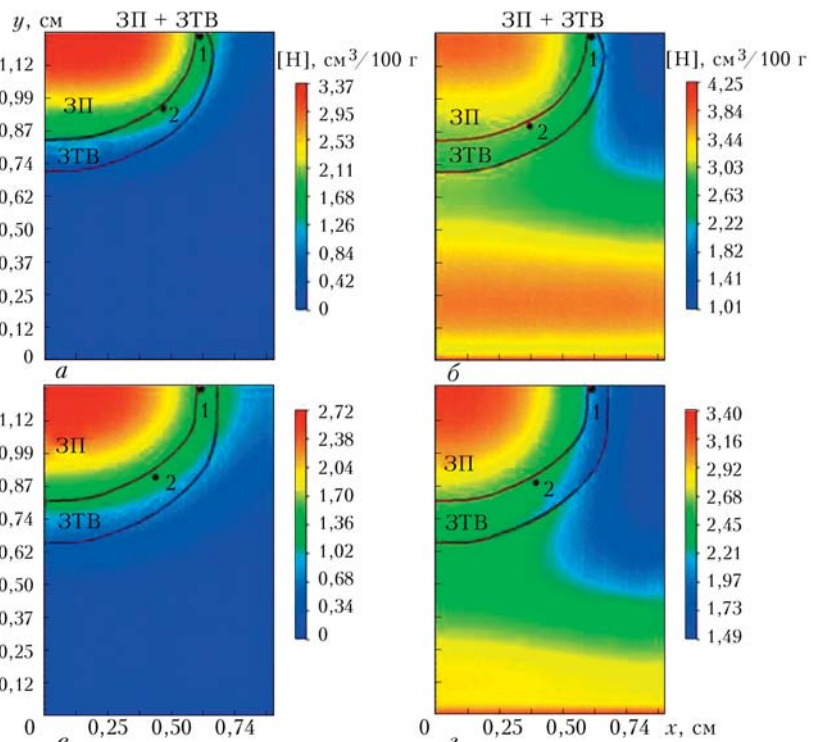


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но при  $\delta_{\min} = 10 \text{ мм}$

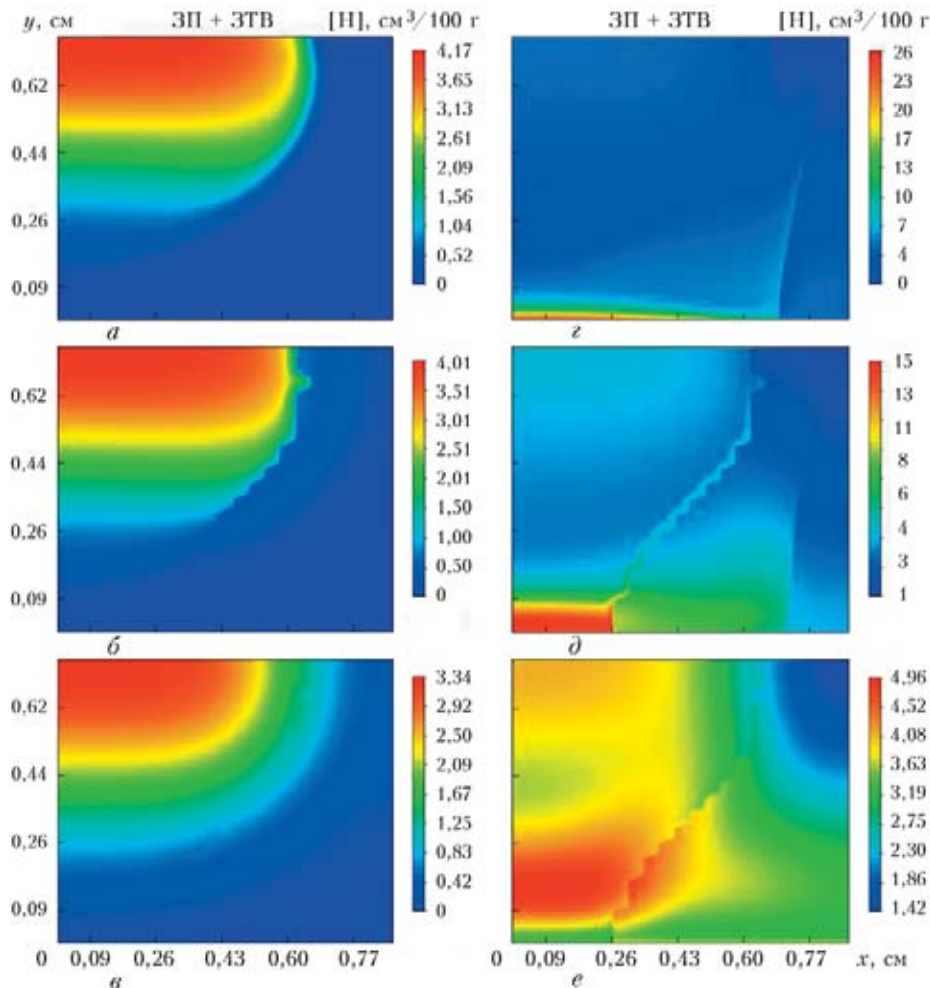


Рис. 8. Концентрация диффузионного водорода при  $\delta_{\min} = 5 \text{ мм}$  и  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  в различные моменты времени  $t = 2$  (а, г), 10 (б, д) и 58 (в, е) с момента прохождения данного сечения источником сварочного нагрева при  $P_{H_2} = 0$  (а–в) и 7,5 ата (г–е) в ЗП и ЗТВ



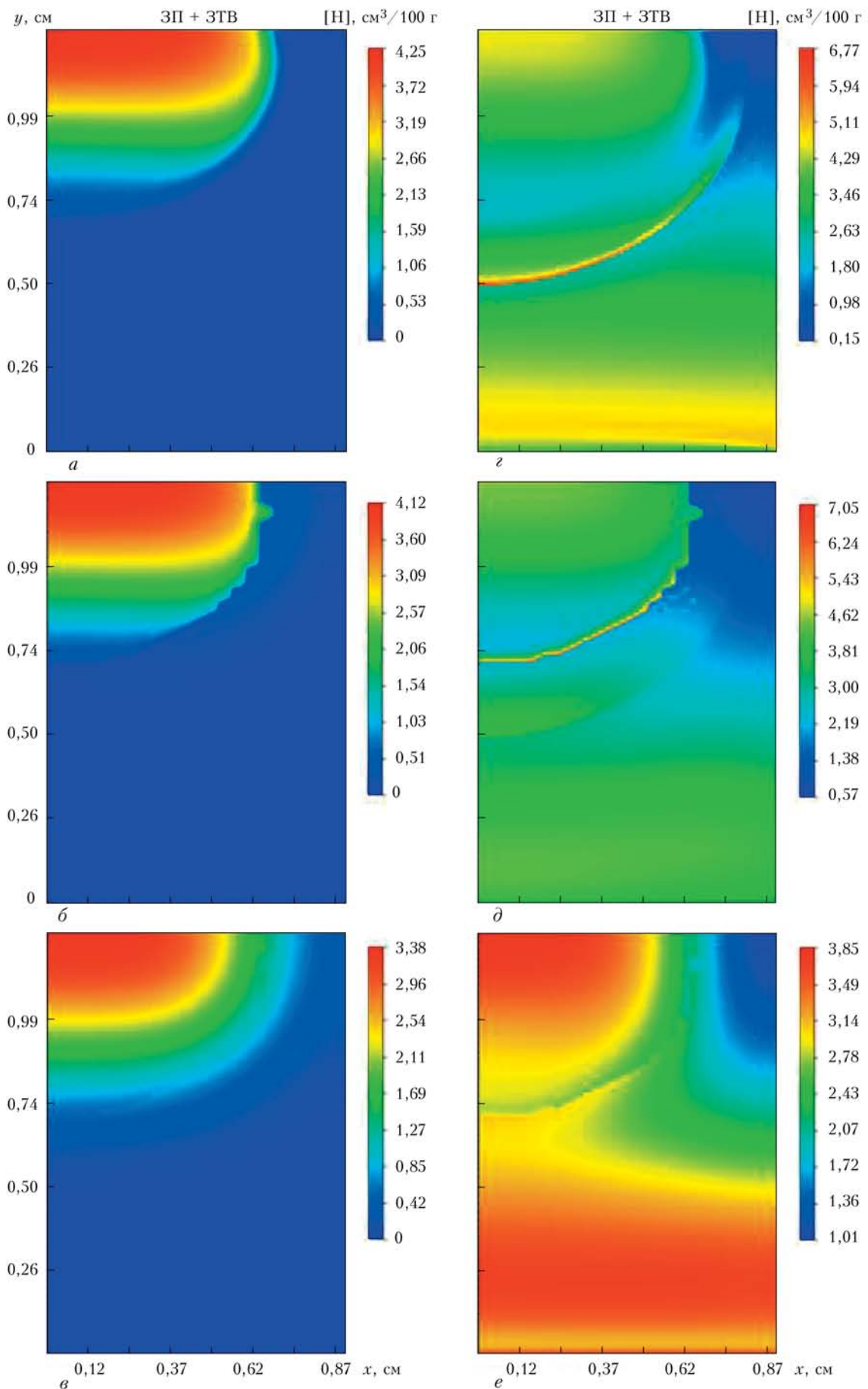


Рис. 9. То же, что на рис. 8, но при  $\delta_{\min} = 10$  мм



ния водорода  $P_{H_2} = 7,5$  ата внутри трубы в зоне локального нагрева стенки происходит значительное насыщение металла диффузионным водородом (концентрация достигает значений около  $26 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ) по сравнению с вариантом, когда  $P_{H_2} = 0$  и соответствующая концентрация водорода достигает значений примерно  $4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Однако при охлаждении металла эта высокая концентрация водорода резко снижается и уже при  $t = 58 \text{ с}$  она для обоих случаев отличается не столь существенно.

Увеличение  $\delta_{\min}$  до  $10 \text{ мм}$  (см. рис. 9, а, б) заметно снижает влияние потока водорода из трубы при  $P_{H_2} = 7,5$  ата на распределение последнего в металле ЗТВ, поскольку эта зона расположена заметно дальше от внутренней поверхности трубы. В итоге максимальная концентрация достигает не больше  $7 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  (рис. 9, б) по сравнению с  $26 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  на рис. 8, б.

Что касается условий образования холодных трещин, то анализ данных на рис. 6, 7 и табл. 2 позволяет сделать следующие выводы.

Для варианта 1 (см. рис. 3, а, б) в металле ЗТВ при  $\Delta t_{8/5} = 3...5 \text{ с}$  в точке 1 при  $100\% V_M$  содержание диффузионного водорода  $[H] \approx 2,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , а при  $\Delta t_{8/5} = 7...8 \text{ с}$  и  $35\% V_M$   $[H] \approx 1,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  (см. рис. 6, а, точка 2), т. е. наиболее острые условия по водороду наблюдаются в металле ЗТВ в углу соединения поверхности металла сварного шва с основным металлом (точка 1).

Согласно [7] показатель чувствительности

$$\phi = 12P_{\text{см}} + \log H, \quad (5)$$

где

$$P_{\text{см}} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{V}{10} + 5 B; \quad (6)$$

$H$  — содержание диффузионного водорода в наплавленном металле.

Для рассматриваемой стали (см. рис. 5) при  $P_{H_2} = 0$   $P_{\text{см}} = 0,272$ ; соответственно для точки 1 на рис. 6, а  $P_1 = 4,264$ . В случае  $P_{H_2} = 7,5$  ата (рис. 6, б) при той же микроструктуре локальная концентрация диффузионного водорода  $[H]_{\text{лок}}$  заметно изменяется: в точке 1  $[H]_{\text{лок}} = 3,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , в точке 2  $[H] = 4,9 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Соответственно эквивалентную величину  $H_{\text{экв}}$  для формулы (5) с учетом линейной зависимости результатов на рис. 6, 7 от содержания водорода в наплавленном металле ( $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ) можно определить по зависимости

$$H_{\text{экв}} = 10 \text{ см}^3/100 \text{ г} \frac{[H]_{\text{лок}}(7,5)}{[H]_{\text{лок}}(0)}, \quad (7)$$

где  $[H]_{\text{лок}}(7,5)$ ,  $[H]_{\text{лок}}(0)$  — соответственно локальные концентрации в точках 1, 2 при  $P_{H_2} = 7,5$  и  $P_{H_2} = 0$  ата.

В табл. 3 для рассматриваемых на рис. 6, 7 вариантов 1–4 приведены соответствующие исходные данные по микроструктуре и локальным значениям концентрации водорода  $[H]_{\text{лок}}(P_H)$  в точках 1, 2 и результаты расчетов по (5)–(7), демонстрирующие степень возможного влияния поступления диффузионного водорода в металл ЗТВ на риск образования холодных (водородных) трещин.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что дополнительный источник диффузионного водорода, связанный с транспортируемым по трубопроводу природным газом, при ремонтной сварке под давлением может приводить при малых  $\delta_{\min}$  к существенному насыщению зоны сварочного нагрева диффузионным водородом в интервале высоких температур. Однако в процессе охлаждения стенок трубы происходит выравнивание концентрации диффузионного водорода как по металлу стенки, так и между стенкой и водородсодержащим слоем в пристеночной области с парциальным давлением  $P_{H_2}$ . В результате при температурах ниже  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $P_{H_2} < 7,5$  ата ( $\approx 0,75 \text{ МПа}$ )

влияние дополнительного источника диффузионного водорода на образование холодных трещин невелико и вполне может быть компенсировано низким содержанием водорода в присадочном металле. Однако при более высоких парциальных давлениях диффузионного водорода  $P_{H_2} > 7,5$  ата риск образования холодных трещин существенно возрастает.

Определение реального значения  $P_{H_2}$  или ее уровня на действующих магистральных газопроводах представляется достаточно актуальной задачей. С этой целью авторами статьи были организованы экспериментальные измерения на действующих газопроводах:

в районе КС «Боярка» ( $P_{\text{раб}} = 4,8 \text{ МПа}$ ,  $D \times \delta = 700 \times 16 \text{ мм}$ ,  $T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ );

КС «Кременчуг» ( $P_{\text{раб}} = 7,5 \text{ МПа}$ ,  $D \times \delta = 700 \times 16 \text{ мм}$ ,  $T = 48 \text{ }^\circ\text{C}$ );

в районе ГРС ТЭЦ 5 ( $P_{\text{раб}} = 4,5 \text{ МПа}$ ,  $D \times \delta = 350 \times 11 \text{ мм}$ ,  $T = 13 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Суть измерений заключалась в нанесении на участок наружной поверхности трубопровода слоя глицерина толщиной  $3...5 \text{ мм}$ , предвари-



Т а б л и ц а 3. Результаты расчетов параметра риска образования холодных трещин для вариантов 1–4

Вариант	$T_0, ^\circ\text{C}$	Точки	$V_M, \%$	$P_{H_2}, \text{ ата}$	$[H]_{\text{лок}}, \text{ см}^3/100 \text{ г}$	$\phi$	$\frac{\phi}{4,264}$
1 (рис. 6, а, б)	20	1	95	0	2,0	4,264	1,0
				7,5	3,0	4,440	1,03
		2	50	0	1,5	4,264	1,00
				7,5	4,9	4,750	1,11
2 (рис. 6, в, з)	150	1	30	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,5	4,490	1,05
		2	20	0	1,7	4,264	1,0
				7,5	3,0	4,510	1,06
3 (рис. 7, а, б)	20	1	100	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,5	4,490	1,05
		2	55	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,5	4,490	1,05
4 (рис. 7, в, з)	150	1	50	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,0	4,39	1,03
		2	45	0	1,5	4,264	1,00
				7,5	2,5	4,490	1,05

тельно очистив его от краски и ржавчины до металлического блеска.

При этом предполагалось, что пузырьки диффузионного водорода, выходящего через стенку трубы, будут фиксироваться в слое глицерина (стандартная процедура глицериновой пробы [8]). Наблюдения на указанных объектах проводили в течение 7...10 сут, в результате не выявлено ни одного пузырька в глицериновой пробе, на основании чего сделано заключение, что значение потока водорода через стенку трубопровода ниже разрешающей способности использованного метода.

Таким образом, в результате проведенных достаточно обширных экспериментальных измерений с помощью глицериновой пробы реального потока водорода через стенку магистральных трубопроводов в Украине, с учетом разрешающей способности около  $1 \text{ мм}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ , установлено, что реальный искомый поток ниже разрешающей способности используемого метода, т. е. согласно табл. 1 парциальное давление диффузионного водорода в магистральных трубопроводах значительно ниже 1 ата (0,1 МПа), что дает основание считать роль диффузионного водорода из транспортируемого по трубопроводу углеводородного газа на образование водородных трещин при ре-

монтной сварке на стенке трубопровода весьма незначительной.

1. *Makhnenko V. I., Korolova T. V., Lavrynets I. G.* Numerical study on the effect of microstructural transformation on hydrogen redistribution in fusion welding of structural steels // Mathematical modelling of weld phenomena 6 / Ed prof. H. Cerjak. Material Modelling Series. — Maney Publishing for the Institute of Materials, Minerals and Mining, 2002. — P. 903–923.
2. *Катц Д. Л.* Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа. — М.: Недра, 1965. — 84 с.
3. *Махненко В. И., Королева Т. В., Лавринцев И. Г.* Влияние микроструктурных изменений на перераспределение водорода при сварке плавлением конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 7–13.
4. *Нечаев Ю. С.* Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов // Усп. физ. наук. — 2008. — 178, № 7. — С. 709–726.
5. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
6. *Seyffarth P., Meyer B., Scharff A.* Großer atlas schweiß-ZTU-Schaubilder. — Dusseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verlag, 1992. — 176 S.
7. *Welding Handbook*. Vol. 4: Materials and Application. Pt 2. — 8th ed. — Miami: AWS, 1998. — 621 p.
8. *Петров Г. Л., Миллион А.* Процессы распределения водорода в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей // Свароч. пр-во. — 1964. — № 10. — С. 1–6.

Possibility of diffusion hydrogen penetration from hydrocarbon gas transported through the gas pipeline during repair welding performance on an operating pipeline has been analyzed. It is shown that at partial pressure of diffusive hydrogen on the inner surface of the steel pipe in the range of 0.10...0.75 МПа at residual wall thickness in the defect zone of more than 5 mm the increase of the parameter of hydrogen (cold) cracking risk is not higher than 5...11 %. Values of experimental measurements of diffusive hydrogen flow through the pipe wall in operating pipelines are given.

Поступила в редакцию 16.05.2011