

## ПРОЖИГАНИЕ СТАЛЬНЫХ ТРУБ ГАЗОДИСПЕРСНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГОРЕНИЯ ТЕРМИТА

С. В. Костин, В. В. Барзыкин, М. А. Нечаев\*, С. А. Ловля\*

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка

\* Научно-исследовательский институт нефтепромышленной геофизики, 140090 Малаховка Московской обл.

Представлены количественные результаты экспериментального исследования прожигания стальных труб в водной среде продуктами горения термита. На основе анализа экспериментальных данных даны рекомендации по оптимальной организации процесса, приведена эмпирическая формула для расчета массы термита, необходимого для прожигания стальной стенки.

В практической деятельности иногда возникает необходимость перфорирования или перерезания металлических конструкций в водной среде, порой в малодоступном месте, например при ликвидации аварий на нефтепромыслах, когда следует разрезать и извлечь часть трубы или перфорировать трубу для восстановления циркуляции раствора в скважине. В данной статье рассматривается возможность осуществления таких или подобных работ пиротехническими средствами.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования прожигания стальных труб изнутри направленной газодисперсной струей продуктов горения термита. Прожигаемый участок трубы обычно находился в воде на глубине  $0,2 \div 0,5$  м. Максимальная глубина погружения образца в скважине составляла 20 м. Прожигались стальные (сталь Ст.3) трубы с внешним диаметром  $60 \div 125$  мм и толщиной стенки  $h = 3 \div 12$  мм. Соотношение длины трубы и ее диаметра было не менее  $10 : 1$ . Внутри трубы соосно помещался термитный заряд в цилиндрической стальной гильзе, которая центрировалась специальными вкладышами для предотвращения ее смещения. Простейшая схема опыта по прожиганию трубы представлена на рисунке. Внутри цилиндрической гильзы сгорает заряд, образующиеся раскаленные продукты представляют собой смесь газообразных, жидких и твердых компонентов. После пиролиза бронировки горизонтального щелевидного сопла — эпоксидного клея с наполнителем (порошок алюминия АСД-4) — высокотемпературная смесь в виде газодисперсной веерной струи истекает наружу, проходит сквозь воду, заполняющую внутритрубную полость, и воздействует на стенку трубы. Состав струи,

ее теплофизические и динамические характеристики зависят от рецептуры заряда, температуры и давления в камере сгорания гильзы. В качестве основы горючей смеси комбинированного заряда железоалюминиевый термит (смесь 25 % алюминия АСД-4 и 75 % трехоксида железа ч.д.а.), обладающий большим тепловым эффектом реакции ( $3878$  кДж/кг). Плотность термита  $1,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Конечные продукты реакции ( $Al_2O_3$  и Fe) находятся в конденсированном состоянии. Однако в течение реакции возможно образование промежуточных га-

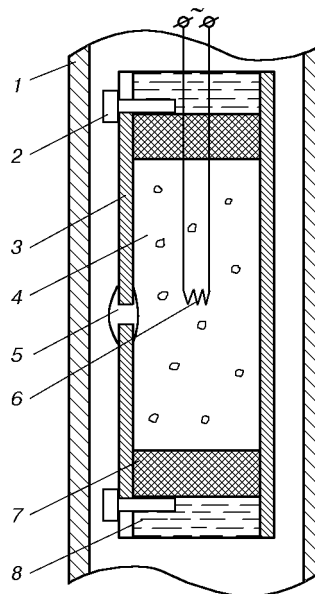


Схема эксперимента:

1 — прожигаемая труба, 2 — стопорный болт, 3 — гильза, 4 — термитная смесь, 5 — бронированное сопло, 6 — электроспираль, 7 — деревянная пробка, 8 — бронировка, эпоксидный клей

зообразных полупродуктов — оксидов железа. С целью увеличения импульса газодисперсной струи в состав заряда в виде чешуек вводилась газообразующая смесь эпоксидного клея с перхлоратом калия в соотношении 1 : 1. Содержание добавки варьировалось в пределах  $2 \div 20\%$  от массы термита. Зажигание осуществлялось электрической спиралью в центре заряда с целью инициирования двух фронтов горения, распространяющихся в противоположные стороны. Этим достигались скорость процесса и, соответственно, уменьшение теплотеря и быстрое получение высокотемпературных продуктов реакции. При приближении фронта горения частично газифицирующейся смеси к загерметизированным торцевым поверхностям гильзы около них образуются так называемые «газовые пробки» [1] — области повышенного давления газообразных веществ. Это должно способствовать оттоку продуктов реакции от торцов к щелевидному соплу в центре гильзы.

Проведен термодинамический расчет состояния продуктов горения, давления в камере сгорания гильзы и адиабатической температуры горения после полного завершения экзотермической реакции в замкнутом объеме. По-

скольку исходные термодинамические характеристики эпоксидного клея отсутствуют, в расчете использованы данные по бензойной кислоте, имеющей аналогичный набор составляющих ее химических элементов и аналогичный характер химических связей. Осредненное значение коэффициента уплотнения смеси комбинированного заряда принято равным 0,5. Предполагается, что поры заполнены воздухом ( $80\% \text{N}_2 + 20\% \text{O}_2$ ) при давлении 1 атм, начальная температура 400 К (для условий глубокой скважины). Количество газифицирующейся добавки составляло 2 и 20% (сверх 100%) от массы термита. Из результатов расчетов следует, что на основе железоалюминиевого термита можно изготовить заряд, при сгорании которого достигаются высокие температура и давление конечных продуктов в камере сгорания (табл. 1). При этом конденсированная фаза состоит из жидких фаз Fe и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а газовая — в основном из CO.

В газодисперсной струе могут присутствовать вещества, способные химически взаимодействовать с материалом трубы, например оксиды металлов, которые не успели прореагировать с компонентами заряда или изначально содержались в нем в избытке. В железоалюмини-

Таблица 1

Характеристики состояния продуктов горения термита, содержащего добавку смеси бензойной кислоты с перхлоратом калия

Добавка к исходному составу, %	Продукты горения	Массовое содержание, %	Фаза	Давление, атм		Адиабатическая температура горения, К
				парциальное	полное	
2	Fe	51,37	Жидкость	—	673,64	3464
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	46,33	— // —	—		
	CO	1,49	Газ	408,64		
	$\text{H}_2$	$4 \cdot 10^{-4}$	— // —	134, 55		
	KCl, $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ , HCl, AlCl, $\text{N}_2$	0,4	— // —	130,4		
20	Fe	43,76	Жидкость	—	4991,6	3264
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	39,4	— // —	—		
	KCl	3,44	— // —	—		
	CO	10,78	Газ	3269,9		
	$\text{H}_2$	0,33	— // —	1399,5		
	$\text{CH}_4$ , KCl, $\text{H}_2\text{O}$	1	— // —	322,3		

евом термите таковым может быть оксид железа. Согласно термодинамическому расчету  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  реагирует с железом, например стенкой трубы, с образованием жидкого оксида  $\text{FeO}$ . Расчет выполнен для давления в области реакции, равного 300 атм, при температуре 1900 и 2500 К. Следовательно, имеются предпосылки для исследования термохимического воздействия продуктов горения на прожигаемый материал.

При проектировании экспериментального образца проведен качественный анализ термомеханического воздействия струи продуктов горения на прожигаемую поверхность. При этом использовались теории турбулентных струй и воздействия струй на преграду [2, 3] и теория пробивания [3]. Показано, что эффективность прожигания струей продуктов реакции возрастает

— с увеличением температуры струи, ее эффективной теплопроводности, плотности и со снижением кинематической вязкости;

— при увеличении давления продуктов горения, приводящем к росту градиента скорости потока на внешней границе пограничного слоя в области течения пристенной струи, что увеличивает интенсивность теплообмена струи с прожигаемой стенкой и отвод расплава от нее.

Все вышеперечисленные факторы, а также особенности формирования струи [2] учитывались при подборе рецептуры состава и анализе роли соотношений геометрических параметров струи, сопла и прожигаемой стенки. Под «прожиганием» подразумевалось нарушение целостности материала стенки трубы в результате комплексного — термомеханического и термохимического — воздействия на нее высокотемпературной газодисперсной струей.

Рассмотрим результаты экспериментов. В соответствии с особенностями формирования струи [2] при исследовании влияния соотношения ее геометрических параметров на процесс прожигания в качестве характерного размера газодисперсной струи взята высота сопла. Оказалось, что оптимальное соотношение достигается в случае, когда высота сопла и расстояние между соплом и стенкой трубы равны толщине прожигаемой стенки. Если расстояние между соплом и стенкой оказывалось меньше высоты сопла, на стенке трубы появлялись продольные трещины, возникновение которых объясняется сильным гидравлическим ударом. Если же

расстояние между соплом и стенкой трубы было больше высоты сопла, глубина прожигания стенки уменьшалась.

Необходимое количество термита зависит от толщины и площади поверхности прожигаемого участка стенки трубы. Для оценочного расчета минимально необходимого количества термита для прожигания сквозной щели или канавки глубиной  $\delta$  в стальной стенке (сталь Ст.3) можно использовать эмпирическую формулу

$$m/S = k\delta,$$

где  $m$  — масса термита, кг;  $S$  — площадь сопла,  $\text{мм}^2$ ;  $k = 2,2 \cdot 10^{-4}$   $\text{кг}/\text{мм}^2$ . При соблюдении рекомендованного выше соотношения геометрических параметров струи и стенки трубы погрешность расчетов не превышала 30%. В табл. 2 приведены некоторые расчетные и экспериментальные данные по прожиганию.

Количество газифицирующейся добавки должно быть достаточным для обеспечения выброса конденсированной массы высокотемпературного продукта горения из гильзы через сопло. Из сопоставления приближенных термодинамических расчетов и результатов эксперимента можно предположить, что подъем давления в камере сгорания гильзы должен быть не менее  $p = 500 + p_{\text{ск}}$  [атм], где  $p_{\text{ск}}$  — гидростатическое давление в скважине на глубине проведения работ. Для оценки можно полагать, что сгорание 1% (от массы термита) газифицирующейся смеси повышает давление на  $\approx 250 \div 350$  атм. Вязкую полимеризующую смесь следует наносить тонким слоем внутри цилиндрической поверхности гильзы или добавлять в виде затвердевших чешуек, равномерно распределяя по объему термитной смеси. При этом достигается высокая полнота выгорания газифицирующегося компонента за время

Таблица 2  
Расчетные и экспериментальные данные по глубине прожигания стальной стенки трубы

$m$ , кг	$S$ , $\text{мм}^2$	$h$ , мм	$\delta$ , мм	
			расчет	эксперимент
0,4	275	7	6,6	Насквозь
1,476	1000	7	6,7	— // —
1,850	1120	7	7,5	— // —
1,967	1130	8	7,9	— // —
0,520	384	9	6	5
0,850	659	12	5,9	7

процесса. Продукты горения термита практически полностью выбрасываются через сопло, остаток в гильзе менее 5%. Длина заряда при этом не превышала пяти его диаметров. При значительном увеличении длины зарядной части гильзы возможно снижение выброса конденсированных продуктов реакции и, соответственно, снижение эффективности использования всей массы заряда.

Результаты проведенного исследования были использованы при проектировании опытного образца термитного перфоратора, в конструкции которого использовались стандартные узлы и уплотнения, применяемые в геофизическом оборудовании. В новой конструкции сопло вскрывалось не при прожигании бронировки, а при сдвиге поршня с резиновыми уплотнениями, перекрывающего сопло. Поршень удерживался срезаемой шпилькой. Усилие среза шпильки, а следовательно, давление внутри перфоратора регулировались диаметром и материалом шпильки. После достижения внутри перфоратора расчетного давления происходило смещение поршня с открытием сопла и выбросом продуктов горения термита. Испытание новой конструкции успешно проведено в наземном водоеме. В ходе испытаний была перфорирована труба диаметром 110 мм. Тем самым показана принципиальная возможность использования термитов в перфораторах для скважин.

## ВЫВОДЫ

- Предложено оптимальное для процесса прожигания соотношение геометрических параметров высокотемпературной струи продуктов горения термита и прожигаемой ею стенки трубы.
- Приведена эмпирическая формула для оценочного расчета минимально необходимого количества термита для прожигания стальной стенки.
- Показана возможность практического использования высокотемпературных продуктов горения термита в специальных устройствах — термитных труборезах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Костин С. В., Шкадинский К. Г., Струнина А. Г. и др.** Нестационарные торцевые эффекты при горении малогазовых составов // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 5. С. 7–12.
2. **Юдаев Б. Н.** Теплопередача. М.: Высш. шк., 1981.
3. **Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973.

*Поступила в редакцию 27/IV 1998 г.*