

УДК 534.222.2;623.4.082.6

НОВЫЙ КУМУЛЯТИВНЫЙ ТРУБОРЕЗ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ГЛУБОКОВОДНОГО ПРИХВАТА ТРУБ

Y.-F. Cheng^{1,2}, Ch. Tao², R. Liu², Y.-L. Yao², F.-F. Hu², H.-H. Ma³,
Zh.-W. Shen³

¹Аньхойский университет науки и техники, Хуайнань 232001, КНР

²Школа химической инженерии при Аньхойском университете науки и техники, Хуайнань 232001, КНР
849760646@qq.com

³Китайский университет науки и технологии, 230027 Хэфэй, КНР

Прихват труб является одной из технических проблем в буровой промышленности, он оказывает значительное влияние на эффективность бурения и стоимость скважин. Для устранения залипания глубоководных труб разработан новый тип картриджа для кумулятивной резки. Структура картриджа представляет собой линейный кумулятивный заряд, включающий в себя эмульсионное взрывчатое вещество на основе гидрида магния и медные трубки. В процессе детонации эмульсионного взрывчатого вещества медные трубки образуют несколько линейных кумулятивных струй по кольцу, которые прорезают застрявшую бурильную трубу. Результаты показывают, что свойства эмульсионного взрывчатого вещества на основе гидрида магния соответствуют требованиям, предъявляемым к взрывчатому веществу для использования его в условиях, существующих в окружающей среде в точке залипания. Картридж для кумулятивной резки был успешно применен в медной шахте для решения проблемы с застрявшей трубой, и эксперимент показал хорошие результаты.

Ключевые слова: заклинившая труба, бурение, кумулятивный резак, кумулятивный заряд, эмульсионное взрывчатое вещество.

DOI 10.15372/FGV20210114

ВВЕДЕНИЕ

Инциденты с застрявшей трубой — это незапланированные события, создающие серьезные проблемы при буровых работах, которые влекут за собой дополнительные расходы. Существует множество причин, которые могут привести к заклиниванию труб, в том числе обрушение скважины, механический прихват, прилипание при потере циркуляции и др. На протяжении десятилетий резка труб затруднялась из-за ограничений по внутреннему диаметру и высокому давлению на дне пробуренной скважины [1]. При абразивно-суспензионной резке используется твердое ве-

щество в вязкой жидкости, прокачиваемой через вращающееся сопло при высоком давлении, что вызывает истирание трубы на две части. Однако данный метод требует применения оборудования для закачки и откачки абразивов и проведения спуско-подъемных операций с использованием колтюбинга (гибких труб) либо сочлененных с соплом труб.

Химические резаки работают на основе процессов окисления/восстановления и обеспечивают беспламенный срез, без обломков, однако основным фактором, влияющим на процесс разрыва, является гидростатическое давление [2].

Плазменные резаки или резаки на основе термитов обладают более широким диапазоном допустимых температур, чем все другие методы разделения, могут преодолевать сопротивление труб из нержавеющей стали, испытываемое в процессе окисления при химической резке, но они оставляют отработавшее топливо и шлак от трубы в стволе скважины, поэтому следует соблюдать осторожность при резке над откидными, шаровыми и другими клапа-

© Cheng Y.-F.^{1,2}, Tao Ch.², Liu R.², Yao Y.-L.²,
Hu F.-F.², Ma H.-H.³, Shen Zh.-W.³, 2021.

¹State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China.

²School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China. ³CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China.

нами, которые могут быть активированы или вытянуты [3–5]. Механические роторные резки обычно включают в себя расширяющиеся лезвия или «ножи» и приводятся в действие давлением от насоса и вращением, что требует использования сочлененных или гибких систем трубопроводов. При резке металлов высокой прочности время резки увеличивается, так как резак должен медленно двигаться через трубу [6].

Кумулятивные резки имеют круглую форму с линейным кумулятивным зарядом и предназначены для разделения труб по тому же принципу, что и перфорационный заряд [7]. Они широко используются в случае заклинивания труб и дают хорошие результаты при низких затратах. Однако обычный кумулятивный резак с V-образным лайнером должен быть точно сфокусирован, чтобы разрезать трубу без какого-либо ее повреждения за пределами места реза, что трудно контролировать.

В данной статье описан новый кольцевой кумулятивный картридж для ликвидации заклинивания глубоководных труб. Проведенные эксперименты по определению характеристик заряда взрывчатого вещества (ВВ) и действию кумулятивного резака показали, что он может успешно применяться в таких случаях.

КОНСТРУКЦИЯ КОЛЬЦЕВОГО КУМУЛЯТИВНОГО КАРТРИДЖА

Кольцевой кумулятивный резак состоит из ВВ, медных трубок, детонатора, оболочки и дополнительного груза (рис. 1). Оболочка кумулятивного резака представляет собой трубу из ПВХ с внешним диаметром 40 мм и длиной 100 мм. Цилиндрический заряд ВВ располагался по оси картриджа. Между оболочкой и ВВ находилось двенадцать медных трубок, длиной 100 мм с внешним диаметром 7 мм и толщиной оболочки 1 мм.

Детонатор инициировал ВВ, взрыв которого сжимал медные трубки, формируя в результате ряд кумулятивных струй. Оболочка не только защищала внутреннюю структуру картриджа от разрушения, но и обеспечивала высокую плотность заряжения, усиливая режущий эффект. Дополнительный груз был необходим для облегчения спуска картриджа внутрь буровой трубы.

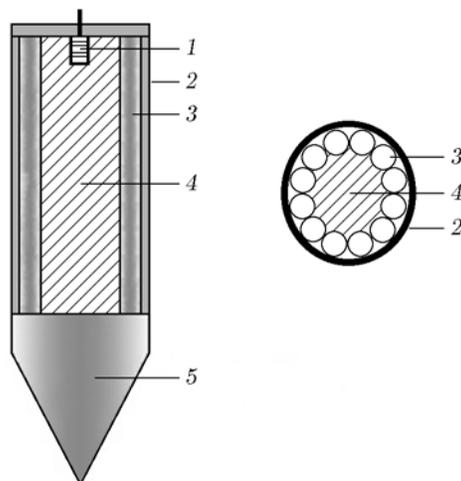


Рис. 1. Конструкция кольцевого кумулятивного картриджа:

1 — детонатор, 2 — оболочка, 3 — медная трубка, 4 — ВВ, 5 — дополнительный груз

СВОЙСТВА ЭМУЛЬСИОННОГО ВВ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ

В случае глубоководного прихвата труб места заклинивания обычно находятся на глубинах, превышающих сотни метров, и заполнены водой. Давление в воде на этой глубине, как правило, составляет несколько мегапаскалей, поэтому ВВ, используемое в новом кумулятивном резаке, должно обладать хорошей устойчивостью к воздействию воды и давления. Кроме того, количество ВВ ограничено небольшим внутренним диаметром буровой трубы. Бризантность ВВ должна быть умеренной, поскольку мощные ВВ, такие как гексоген, могут разрушить обсадную колонну (если она имеется) при резке прихваченной трубы, в то время как ВВ малой мощности приведут лишь к слабому взрывному эффекту.

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) широко применяются во взрывных работах в силу их превосходной водостойкости, безопасности и хороших характеристик при хранении. Однако традиционное ЭмВВ имеет низкие детонационные характеристики и при его использовании возникают проблемы, вызванные десенсибилизацией под действием давления [8], поэтому для нового картриджа для кумулятивной резки было выбрано ЭмВВ на основе гидрида магния (MgH_2).

В экспериментах средний размер частиц микробаллонов и объемная плотность стеклянных микросфер (СМ) составляли соответ-

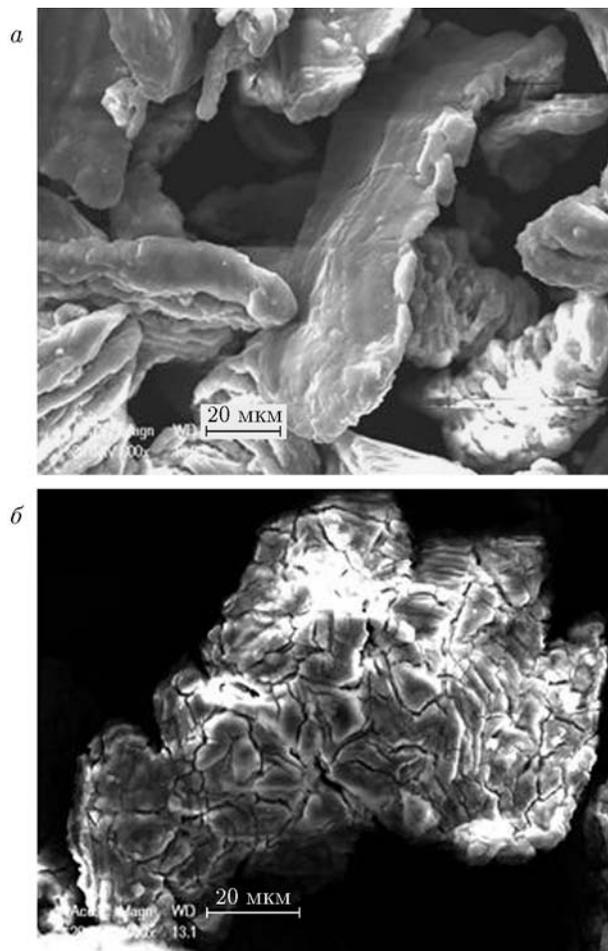


Рис. 2. Микрофотографии порошков MgH_2 :
 а — необработанные, б — покрытые парафином

ственно 55 мкм и 0.25 г/см^3 (производство 3 M Comrapu, США); средний размер частиц MgH_2 составлял 3 мкм , а его чистота и объемная плотность — 98% и 1.45 г/см^3 (производство Alfa Aesar Comrapu, США). Плотность эмульсионной матрицы — 1.31 г/см^3 (производство Chinese Huainan Shun Tai Chemical Co., Ltd). В табл. 1 приведен состав обычного ЭМВВ и ЭМВВ с добавкой гидроксида магния, а в табл. 2 — состав эмульсионной матрицы

Таблица 2

Состав эмульсионной матрицы	
Компонент	Массовая доля, %
NH_4NO_3	75
$NaNO_3$	10
$C_{18}H_{38}$	4
$C_{12}H_{26}$	1
$C_{24}H_{44}O_6$	2
H_2O	8

этих ЭМВВ.

Матрица ЭМВВ типа вода в масле содержит около 8% (мас.) воды, поэтому частицы порошка MgH_2 покрывали парафином (рис. 2), чтобы ингибировать реакцию гидролиза. Водостойкость парафиновой пленки соответствовала требованиям [9, 10]. Стеклообразные микросферы играли роль сенсibilizаторов в обоих типах ЭМВВ, а порошок MgH_2 с покрытием выступал в качестве энергетической добавки. В результате взаимодействия микросфер с ударной волной (УВ), распространяющейся в ЭМВВ, образуются горячие точки, и последующий ход реакции приводит к детонации [11].

Устойчивость ЭМВВ к инициированию после воздействия на него давления выясняли при ударно-волновом сжатии образцов в подводных взрывах. Образцы ЭМВВ располагали под водой на разных расстояниях от заряда гексогена (рис. 3,а), и после подрыва заряда происходило их сжатие ударными волнами. Затем эти образцы испытывали на способность к детонации в емкости для проведения подводных взрывов (см. рис. 3,б). Устойчивость ЭМВВ к воздействию давления оценивали путем сравнения выделяемой энергии от несжатых и от предварительно сжатых образцов ЭМВВ [8]. В экспериментах масса зарядов гексогена и образцов ЭМВВ составляла 10 и 30 г соответственно.

Таблица 1

Рецептуры ЭМВВ

Компоненты ЭМВВ	Массовая доля, %		
	эмульсионная матрица	стеклянные микросферы	MgH_2 , покрытый парафином
Только СМ	98	2	0
СМ + MgH_2	96	2	2

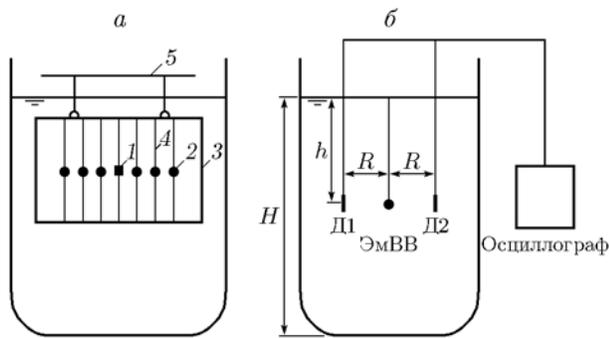


Рис. 3. Схемы эксперимента:

a — ударно-волновое нагружение образцов ЭмВВ: 1 — заряд прессованного гексогена, 2 — образцы ЭмВВ, 3 — стальная рама, 4 — стальные проволоки, 5 — система крепления; *б* — испытания образцов на взрыв: Д1, Д2 — датчики

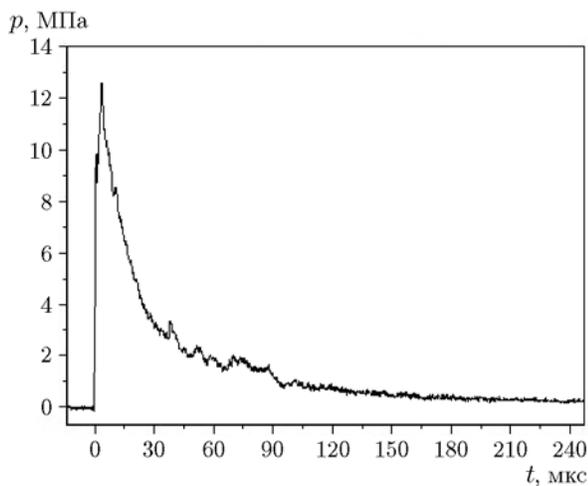


Рис. 4. Профиль давления УВ на расстоянии 70 см от заряда прессованного гексогена

На рис. 4 показан профиль давления от прессованного заряда гексогена на расстоянии 70 см при подводном взрыве. Пиковое давление УВ при этом составляло ≈ 12.8 МПа. Авторы [12] исследовали характеристики подводного взрыва прессованного гексогена экспериментально и численно и могли получить профиль давления УВ в любом месте, проверив его в одной точке. По результатам экспериментов [12] пиковые давления УВ от прессованного заряда гексогена на расстояниях 25, 50 и 75 см составили 77.9, 19.2 и 11.6 МПа соответственно.

Чем меньше расстояние между зарядом гексогена и образцом ЭмВВ, тем сильнее воздействие на него, при этом ударная нагрузка обратно пропорциональна расстоянию между образцом ЭмВВ и зарядом гексогена. На ха-

Таблица 3

Пиковые давления от ЭмВВ, предварительно сжатых УВ различной интенсивности

Компоненты ЭмВВ	Пиковое давление УВ, МПа, при давлении ударного сжатия, МПа			
	77.9	19.2	11.6	0
Только СМ	5.8	8.4	10.4	18.0
СМ + MgH ₂	14.8	18.6	18.7	20.4

рактеристики детонации ЭмВВ после предварительного сжатия влияет повреждение десенсибилизирующих микросфер. Пиковые давления УВ от несжатых ЭмВВ на основе одних только стеклянных микросфер и стеклянных микросфер + MgH₂ составляли 18.0 и 20.4 МПа соответственно. В табл. 3 приведены пиковые давления УВ от образцов ЭмВВ, предварительно сжатых УВ в подводных взрывах, проведенных по схеме рис. 3, б. Эти данные показывают, что все пиковые давления уменьшились после сжатия образцов и степень уменьшения коррелировала с ударной нагрузкой.

Чтобы оценить уменьшение пикового давления УВ от ЭмВВ после предварительного сжатия, мы ввели параметр коэффициент десенсибилизации для описания снижения взрывных характеристик ЭмВВ вследствие сжатия [13]. Соответствующие результаты представлены в табл. 4. Видно, что при одной и той же ударной нагрузке уменьшение пикового давления у ЭмВВ с добавкой MgH₂ намного меньше, чем у ЭмВВ без такой добавки. Пиковое давление УВ от ЭмВВ с добавкой MgH₂ уменьшилось только на 8.3 % при сжатии ударной нагрузкой 11.6 МПа, поэтому его устойчивость к давлению соответствовала требованию к ВВ для ведения глубоководных взрывных работ.

Таблица 4

Уменьшение пикового давления УВ от ЭмВВ, сжатых различной ударной нагрузкой

Компонент ЭмВВ	Коэффициент десенсибилизации, %, при давлении ударного сжатия, МПа		
	77.9	19.2	11.6
Только СМ	67.8	53.3	42.2
СМ + MgH ₂	27.5	8.8	8.3



Рис. 5. Бризантность различных ЭМВВ, характеризуемая сжатием свинцового блока:

1 — исходный образец, 2 — после подрыва ЭМВВ только со стеклянными микросферами, 3 — после подрыва ЭМВВ со стеклянными микросферами + MgH_2

Бризантность ЭМВВ испытывалась по степени обжатия свинцового цилиндра (проба Гесса) традиционным методом, широко используемым для измерения бризантности ВВ [14]. Экспериментальные результаты применения ЭМВВ представлены на рис. 5. Значения обжатия свинцового цилиндра ЭМВВ на основе только стеклянных микросфер и с добавлением MgH_2 составили 16.0 и 24.3 мм соответственно. Очевидно, что бризантность ЭМВВ с добавкой гидрида магния намного выше, чем у ЭМВВ только со стеклянными микросферами. Более высокая бризантность не только улучшает эффект от взрыва картриджа в ограниченном пространстве, но также является необходимым условием для формирования кумулятивных струй резки. Поэтому для нового кумулятивного картриджа было выбрано ЭМВВ с добавкой MgH_2 , поскольку оно обладает водостойкостью, высокой мощностью и хорошей устойчивостью к давлению.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО РЕЗКЕ СТАЛЬНОЙ ТРУБЫ

Для проверки работы кумулятивного резака был проведен эксперимент по резке стальной трубы. Конструкция кумулятивного резака представлена на рис. 1. Для моделирования буровой штанги использовали стальную трубу, ее внутренний диаметр 66 мм, толщина корпуса 5 мм. На рис. 6 показаны детали эксперимента по резке стальной трубы и защитное устройство, выступавшее также в качестве контрольной пластины-свидетеля.

Результаты численного моделирования с помощью программного обеспечения ANSYS работы кумулятивного резака приведены на рис. 7. Результаты эксперимента по резке, ко-

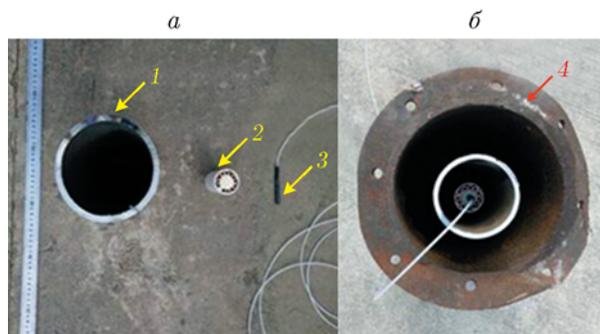


Рис. 6. Схема и детали эксперимента по резке стальной трубы:

а — вид сверху: 1 — стальная труба, 2 — кумулятивный картридж, 3 — детонатор; *б* — вид слева: 4 — защитное устройство

торые хорошо соответствуют финальной стадии моделирования, показаны на рис. 8. Вследствие взрыва 12 медных трубок формируются кумулятивные струи и в стальной трубе образуются 12 разрезов. Целостность стальной трубы была серьезно нарушена, а на плите-свидетеле (защитном устройстве) практически не было следов проникновения, следовательно, бризантность кумулятивного резака можно считать приемлемой.

Чтобы продемонстрировать эффект от наличия медных трубок в кумулятивном резаке, был создан резака, в котором половина трубок отсутствовала. После взрыва та часть стальной трубы, на которую воздействовали струи от медных трубок, оказалась сильно разрушенной, в то время как со стороны, где трубки отсутствовали, на внутренней поверхности стальной трубы только образовалась вмятина (углубление), что видно на рис. 9.

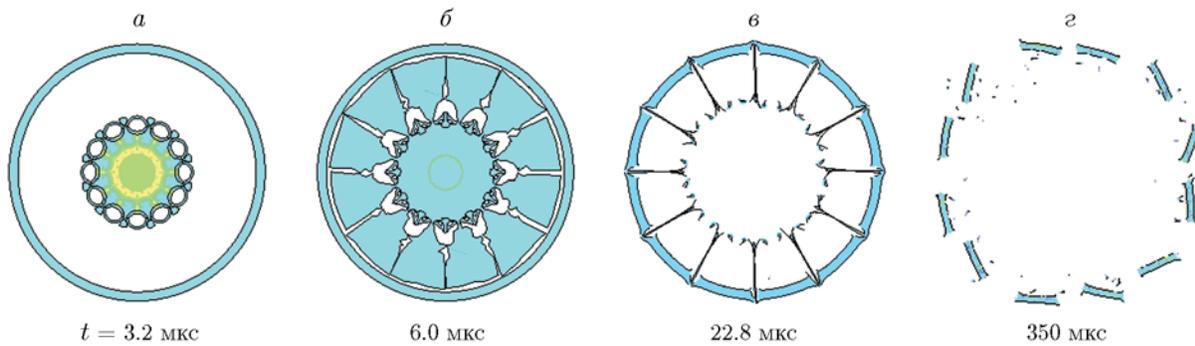


Рис. 7. Результаты численного моделирования работы кумулятивного резака

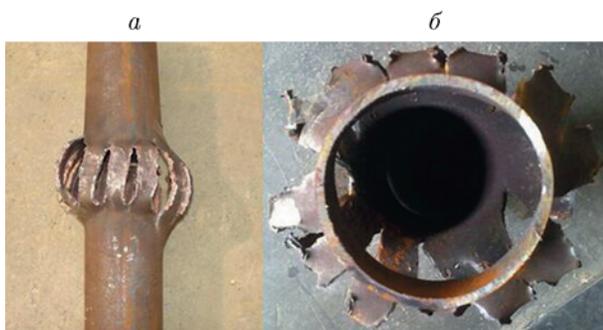


Рис. 8. Результат разрушения стальной трубы кумулятивным резаком:
a — вид сбоку, *б* — вид сверху

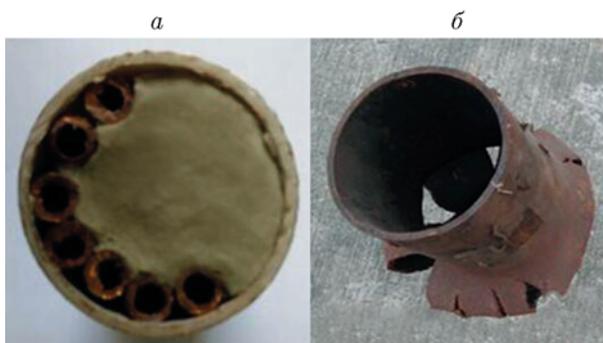


Рис. 9. Результат работы резака с половинным числом трубок:
a — заряд с половинным числом трубок, *б* — разрушения стальной трубы с разных сторон резака

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Инцидент с застрявшей трубой произошел в процессе бурения керна на медном руднике Китая. На глубине 276 м под землей буровой инструмент плотно прилип к твердым песчанникам, а скважина была полна шлама. Для устранения заклинивания были предприняты многочисленные попытки (такие, как вращение



Рис. 10. Картриджи для кольцевой кумулятивной резки, предназначенные для ликвидации глубоководного прихвата

или перемещение вверх или вниз), но все они оказались безуспешными. В качестве окончательной технологии для ликвидации прихвата был использован картридж с кольцевым кумулятивным резаком (рис. 10). Внутренний диаметр бурильной трубы — 65 мм, толщина стенки — 12 мм, поэтому внешний диаметр картриджа составлял 50 мм, структура кумулятивного заряда приведена на рис. 1.

Как показано на рис. 11, корпус кумулятивного резака был опущен на стальном тросе до точки прихвата (немного выше, чем буровое долото), ЭмВВ было инициировано электродетонатором. После взрыва бурильная труба в точке прилипания была пронизана металлическими струями, в ней образовалось много трещин, что серьезно понизило прочность конструкции бурильной трубы в месте взрыва, и

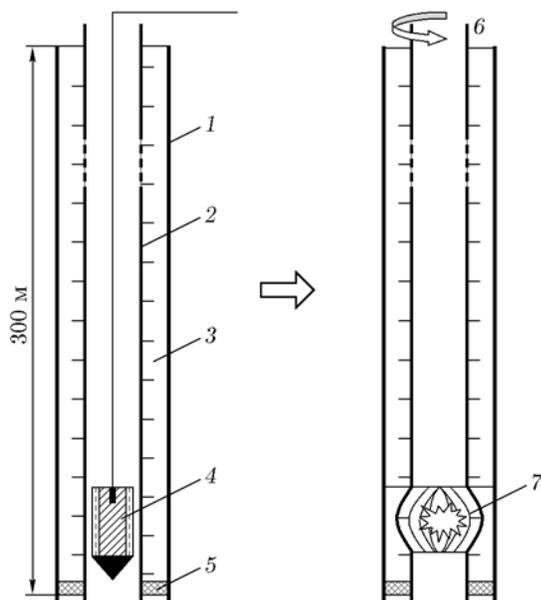


Рис. 11. Схема процесса ликвидации прихвата:

1 — стенка скважины, 2 — буровая труба, 3 — шлам, 4 — картридж кольцевого кумулятивного резака, 5 — место прихвата, 6 — вращение, 7 — разрушение трубы после взрыва

поэтому ее можно было разорвать в области перфорации путем приложения крутящего момента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый кумулятивный картридж для резки глубоководных труб при ликвидации их прихвата. Изучены детонационные характеристики заряда ЭМВВ. Экспериментальные результаты показали, что устойчивость к воздействию статического давления и бризантность ЭМВВ с добавкой MgH_2 намного лучше, чем у традиционных ЭМВВ на основе только стеклянных микросфер. Структура картриджа представляла собой кумулятивный заряд, который состоял из ЭМВВ с добавкой MgH_2 и медных трубок. При взрыве медные трубки образовывали многочисленные линейные металлические струи вдоль радиального направления. Проведен эксперимент по резке буровых труб для проверки возможностей нового кумулятивного резака. Новый картридж для кумулятивной резки имеет ряд преимуществ: хороший режущий эффект, простота производства, экономичность и экологичность. Он был успешно применен в мед-

ной шахте для ликвидации залипания трубы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая. (Nos.11972046) и Китайского научного фонда для молодых ученых (2017M610381 and 2019M651085).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jahanbakhshi R., Keshavarzi R., Shoorehdeli M. A., Emamzadeh A.** Intelligent prediction of differential pipe sticking by support vector machine compared with conventional artificial neural networks: an example of Iranian offshore oil fields // *SPE Drill. Complet.* — 2012. — V. 27, N 4. — P. 586–595. — <https://doi.org/10.2118/163062-PA>.
2. **Segura J.** Drillpipe cutting at ultrahigh pressure proven for remediating deepwater stuck-pipe hazards // *SPE Drill. Complet.* — 2011. — V. 26, N 4. — P. 569–577. — <https://doi.org/10.2118/139511-PA>.
3. **Cole J. F.** Pyro technology for cutting drill pipe and bottomhole assemblies // *SPE/IADC Drilling Conf.*, March, 1999, Amsterdam. — Paper SPE 52824. — P. 9–11. — <https://doi.org/10.2118/52824-MS>.
4. **Jurgens M. S.** Effect of well variables on the performance of chemical, jet, and RCT tubing cutters // *SPE Drill. Complet.* — 2009. — V. 24, N 3. — P. 378–382. — <https://doi.org/10.2118/110776-MS>.
5. **Portman L. N., Blades C., Laba A.** 28 % Chrome, 32 % Nickel: A case history on the downhole cutting of exotic completions // *SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition*, April, 2006, The Woodlands, Texas, USA. — Paper SPE 99917. — P. 4–5. — <https://doi.org/10.2118/99917-MS>.
6. **Campbell S., Carter B., Amiel J. P.** Non-explosive tubing cutter for safe, efficient pipe recovery operations // *SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition*, 2009, The Woodlands, Texas, USA. — Paper SPE 121574. — <https://doi.org/10.2118/121574-MS>.
7. **Chen W., Ma H. H., Shen Z. W., Wang D. B.** Experiment research on the rock blasting effect with radial jet cracker // *Tunn. Undergr. Space Technol.* — 2015. — V. 49. — P. 249–252. — <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.05.008>.
8. **Cheng Y. F., Ma H. H., Liu R., Shen Z. W.** Explosion power and pressure desensitization resisting property of emulsion explosives sensitized by MgH_2 // *J. Energ. Mater.* — 2014. — V. 32, N 3. — P. 207–218. — <https://doi.org/10.1080/07370652.2013.818078>.
9. **Cheng Y. F., Wang Q., Liu F., Ma H. H., Shen Z. W., Guo Z. R., Liu R.** The effect of energetic additive of coated MgH_2 on

- the power of emulsion explosives sensitized by glass microballoons // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13, N 3. — P. 349–356. — <https://doi.org/10.22211/cejem/65019>.
10. **Чэн Я.-Ф., Ма Х.-Х., Шень Чж.-У.** Детонационные характеристики эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных гидридом магния // *Физика горения и взрыва.* — 2013. — Т. 49, № 5. — 120–125.
 11. **Medvedev A. E., Fomin V. M., Reshetnyak A. Y.** Mechanism of detonation of emulsion explosives with microballoons // *Shock Waves.* — 2008. — V. 18, N 2. — P. 107–115. — <https://doi.org/10.1007/s00193-008-0141-2>.
 12. **Lin M. J., Ma H. H., Shen Z. W., Wan X. Z.** Effect of aluminum fiber content on the underwater explosion performance of RDX-based explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2014. — V. 39, N 2. — P. 230–235. — <https://doi.org/10.1002/prop.201300091>.
 13. **Cheng Y. F., Yan S. L., Ma H. H., Shen Z. W., Liu R.** A new type of functional chemical sensitizer MgH_2 for improving pressure desensitization resistance of emulsion explosives // *Shock Waves.* — 2016. — V. 26, N 2. — P. 213–219. — <https://doi.org/10.1007/s00193-015-0585-0>.
 14. **Keshavarz M. H., Seif F., Soury H.** Prediction of the brisance of energetic materials // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2014. — V. 39, N 2. — P. 284–288. — <https://doi.org/10.1002/prop.201300047>.

Поступила в редакцию 09.01.2020.

После доработки 25.02.2020.

Принята к публикации 15.05.2020.
