

APPLICATION OF CLAY-FREE DRILLING FLUIDS IN HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING FOR TRENCHLESS INSTALLATION OF UNDERGROUND INFRASTRUCTURE

Petyo Toshev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: p.toshev@mgu.bg

ABSTRACT. The use of clay-free drilling fluids in the construction of horizontal directional drilling (HDD) for trenchless installation of underground infrastructure represents a modern technology applied in the execution of small- to medium-diameter boreholes (gas pipelines, water pipelines, fiber-optic cables, etc.) in urban environments, as well as in projects located within environmentally sensitive areas. The application of clay-free drilling fluids in the field of horizontal directional drilling ensures high productivity of the drilling process, minimal environmental impact, and the possibility for treatment and recycling of the used drilling fluid. This technology allows for the execution of boreholes in hard, medium, and soft geological formations, while providing reliable stabilisation of the borehole, efficient transport of drilled cuttings (borehole cleaning), reduction of friction between the drill string and the borehole walls, cooling of the drill string, as well as inhibition and stabilisation of water-sensitive formations.

Key words: horizontal directional drilling (HDD), clay-free drilling fluid.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА БЕЗГЛИНЕСТИ ПРОМИВНИ ТЕЧНОСТИ ПРИ ПРОКАРВАНЕ НА ХОРИЗОНТАЛНО НАСОЧЕНИ СОНДАЖИ ЗА БЕЗИЗКОПНО ПОЛАГАНЕ НА ПОДЗЕМНА ИНФРАСТРУКТУРА

Петьо Тошев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Използването на промивни течности на безглинеста основа при прокарването на хоризонтално насочени сондажи за безизкопно полагане на подземна инфраструктура е съвременна технология при прокарването на сондажи с малък до среден диаметър (газопроводи, водопроводи, оптични кабели и др.) в градски условия, както и проекти в рамките на екологично чувствителни райони. Използването на безглинести промивни течности в сферата на хоризонтално насоченото сондиране (ХНС) осигурява висока производителност на сондажния процес, минимално въздействие върху околната среда, както и възможност за почистване и рециклиране на вече използвания сондажен разтвор. Технологиата позволява прокарване на сондажи в твърди, средни и меки геоложки формации, като осигурява надеждно укрепване на сондажния ствол, транспортиране на разрушения материал (почистване на сондажа), намаляване на триенето между сондажния инструмент и стените на сондажа, охлаждане на сондажния инструмент, инхибиране и стабилизиране на водочувствителни формации.

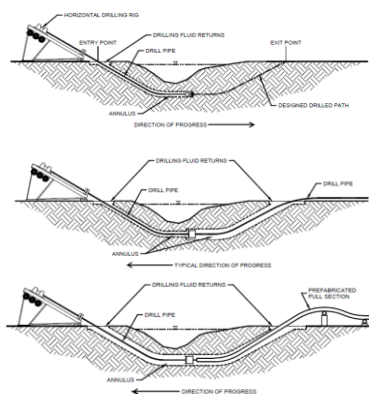
Ключови думи: хоризонтално насочено сондиране (ХНС), безглинести промивни течности.

Въведение

През последното десетилетие безглинестите промивни течности намират все по-широко приложение в сферата на хоризонтално насоченото сондиране (ХНС). Завишените екологични изисквания поставят под въпрос използваните до момента технологии като в същото време се търсят по-ефективни материали и методи за оптимизация на процесите. Използването на безглинести промивни течности в голяма степен отговаря на съвременните изисквания за сондиране в градски условия и по-специално при прокарване на сондажи с малък диаметър. Те осигуряват по-висока производителност на сондажния процес, минимално въздействие върху околната среда, както и възможност за почистване и рециклиране на вече използвания сондажен разтвор. В настоящата статия са разгледани основните принципи за прокарване на хоризонтално насочени сондажи, факторите, влияещи върху избора на промивни течности, основни типове и реагенти, използвани в областта на ХНС, както и основни принципи при рециклирането на използваните разтвори. Разгледани са основните рецептури за приготвяне на разтвори на безглинеста основа, предимствата им спрямо бентонитовите разтвори, както и сферите им на приложение в областта на ХНС.

Хоризонтално насочено сондиране (ХНС), методология и функции

Това е най-разпространеният безизкопен метод за полагане на подземна инфраструктура, като тръбопроводи (газопроводи, ВИК инфраструктура), кабелни трасета и др. Методът дава възможност за минимално нарушаване на земната повърхност, а оттам и намаляване на въздействието върху околната среда и оптимизиране на строително-монтажните разходи. Това прави ХНС един от най-високо ефективните методи за изграждане на подземни инженерни съоръжения. Методът е особено ефективен при прокарване на подземна инфраструктура под пътища, реки, тротоари или гъсто застроени градски райони и др., където изкопните дейности биха причинили сериозни затруднения и неудобства. ХНС включва изпълнение на прецизно контролиран пилотен сондаж по предварително проектирана траектория (посока и наклон), като позволява надеждно управление и преминаване под препятствия, като пътна инфраструктура, водни обекти и съществуващи инженерни мрежи (Bergstrom H, et al., 2024). След изпълнение на пилотния сондаж, посредством разширителни инструменти (разширители), поетапно се увеличава диаметърът на сондажния отвор до достигане на проектния такъв В последващ етап се извършва изтегляне на тръбопровода или съответния елемент през вече проширения сондаж (фиг. 1) (Arumsari P, Tanuwijaya E., 2021).



Фиг. 1. Принципно схема за прокарване на хоризонтален сондаж за полагане на подземна инфраструктура

При необходимост при преминаване под “чувствителна” инфраструктура, като водонаситени зони или пътна инфраструктура, се извършва запълване на образуваното извънтръбно пространство с различни тампонажни смеси. Това се прави с цел предотвратяване на движението на по-горестоящите пластове, както и за чисто хидравлично изолиране (Nachman D. et al., 2021).

Основният фактор за успех на проектите по ХНС е свързан с правилния подбор на промивна течност. При ХНС е налице постоянно натоварване от горележащите пластове, обусловено от теглото на почвата, скалния масив, присъствие на подземни води. В тази връзка параметрите на промивните течности (тип, състав, взаимодействие/реакция с геоложката среда) са от съществено значение за скоростта на сондиране, въздействието върху околната среда и устойчивостта на сондажния отвор по време на изпълнение.

Основните функции на промивната течност при прокарване на ХНС са: почистване на забоя и извънтръбното пространство от просондиран материал или шлам; охлаждане на скалоразрушаващия инструмент; укрепване на стените на сондажа и образуване на тънка, здрава и непроницаема филтрационна кора; изолиране на различни формации една от друга; предотвратяване на загуби, а също и притоци на пластови флуиди в промивна течност при преминаване на нестабилни зони и формации; удържане на шламовите частици; участие в разрушаването на забоя; задвижване на забойни двигатели; намаляване на триенето между сондажния инструмент и стените на сондажа (Аризанов В.П. и Янакиева С.Г., 1986).

Промивни течности в ХНС, типове и реагенти за приготвяне

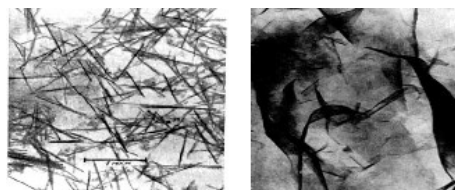
Съществуват множество фактори, които влияят върху избора на промивна течност при прокарването на ХНС (Andelman E). Най-важните от тях са:

- *Параметри на изработката/сондажа (дължина и диаметър).* В повечето случаи, това е един от основните фактори, определящи типа на промивна течност, която ще бъде използвана. При големи диаметри и дължини на изработките използването на полимерни (безглинести) разтвори не е най-правилната технология от гледна точка осигуряване на стабилността на изработката.

- *Екологични ограничения.* Регулаторни органи налагат все повече ограничения върху състава на сондажния разтвор (от екологична гледна точка), изисквайки използването на екологосъобразни компоненти на разтвора.
- *Цена.* От икономическа гледна точка, бентонитът е с по-нисък разход в сравнение с полимерните (безглинести) разтвори, като същевременно осигурява необходимата стабилност на сондажния отвор. В повечето случаи е необходимо добавянето на полимери към бентонитовата суспензия за постигане на определени параметри (носеца способност, инхибиране на водочувствителни формации, контрол на филтрацията, лубрикация и т.н.).
- *Биоразградимост.* Биополимерите обикновено се разглеждат като по-екологосъобразни продукти, алтернатива на бентонита, поради тяхната биоразградимост.
- *Регенерация.* Почти всички бентонитови разтвори биха могли да бъдат рециклирани (след почистване на твърдата фаза, върнати обратно в циркулационната система). При не всички безглинести/полимерни системи това е напълно възможно.

За разлика от сондирането за нефт и газ в практиката за прокарване на ХНС са намерили приложение основно два типа разтвори – на основата на глина и такива на основата на полимери (безглинести разтвори).

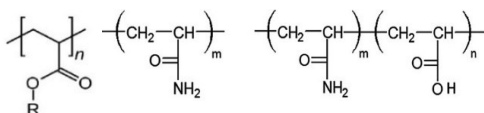
Глинестите разтвори са базирани най-често на основата на монтморилонит, а в някои редки случаи и на атапулгит и много рядко на каолин (фиг.2) (Губанов В.Н., 2006). Промивни течности на основата на бентонитова глина (монтморилонит) са най-разпространени и основно са калциев, натриев и смесен тип в зависимост от преобладаващия тип катиони, което обуславя и съществени разлики в свойствата – набъбване (увеличаване на обема), водосъдържане, пропускливост, пластичност, йонообмен и стабилност. Монтморилонитът има слоеста структура и се характеризира, като “набъбваща глина”. Разтворите на основата на атапулгит са намерили приложение при използване на солена вода за приготвяне на разтвора и при тях се получава т.нар. геолообразна “ненабъбваща” структура поради влакнестият им строеж. В практиката са намерили много ограничено приложение и течности на основата на каолин. По свойства силно наподобяват атапулгитовите глинени, с разликата че не образуват геолоподобна структура и следователно без съществено влияние върху вискозитета.



Фиг. 2. Микроскопски снимки монтморилонит (вдясно) и атапулгит (вляво)

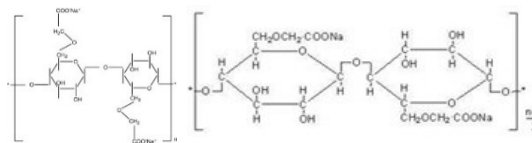
Полимерните разтвори са на синтетична основа (частично хидролизиран полиакриламид, полиакрилат), полусинтетична (полианионна целулоза, карбоксиметил целулоза) и т.нар. биополимери (ксантанова гума, гуар гума, нишесте и т.н.).

Полимерите на синтетична основа (фиг.3) като полиакриламид, частично хидролизиран полиакриламид (РНРА) и полиакрилати се характеризират като нетоксични и слабо до много слабо разложими. Частично хидролизирания акриламид е на основата на модифициран полиакриламид (смес от $-\text{CONH}_2$ и $-\text{COO}^-$ групи), а полиакрилатите са на основата на акрилова киселина/соли (напълно анионен $-\text{COO}^-$). Частично хидролизираният полиакриламид е със смесен заряд (стабилизира и инхибира глинни и шисти), докато полиакрилатите са със силно изразен отрицателен такъв (разделя и диспергира глините) (Кистер Е.Г., 1972).



Фиг. 3. Полимерна структура на полиакрилат (вляво), полиакриламид (в средата) и частично хидролизиран полиакриламид (вдясно)

Полусинтетични полимери. Полианионната целулоза (РАС) представлява натурална модифицирана целулоза, с отрицателно заредени групи $-\text{COO}^-$. Основно се прилага за контрол на филтрацията, повишаване на вискозитета и стабилизиране на разтворите. Полимерната ѝ структура е представена на фиг. 4.



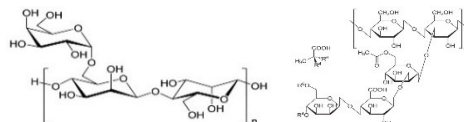
Фиг. 4. Полимерна структура на карбоксиметил целулоза (вляво) полианионна целулоза (вдясно)

Този тип полимери са частично биоразградими (поради химическото модифициране на целулозата, което забавя, но в същото време не отменя процеса на разлагане). Карбоксиметил целулозата (СМС) е друг полусинтетичен полимер, получен чрез химическа модификация на целулоза. Получава се от алкалната обработка на памук или дървесина. Тези полимери контролират филтрацията, но също така и вискозитета. Те са биоразградими (по-бавно разградими от нишестето). С развитието на технологиите през 90-те години на миналия век СМС постепенно загубва позиции спрямо полианионната целулоза, най-вече поради следните недостатъци: слаба разтворимост (в пряка зависимост от температурата), значително по-висока концентрация за постигане на същия ефект и по-малко отрицателни заряди спрямо полианионната целулоза (Fink J.K, 2015) , (Тужиков О.И. и Тужиков О. О., 2016).

Биополимерите са намерили най-широко приложение в ХНС, поради своята биоразложимост, устойчивост в условия на замърсители и способност за подобряване на реологичните свойства на разтворите (Imtiaz A., 2022). Те се произвеждат на основата на растения (целулоза), микроорганизми (бактериална ферментация) и природни захари/ захариди (фиг. 5).

Ксантановата гума е продукт на основата на естествен биополимер – полизахарид, получаван чрез ферментация

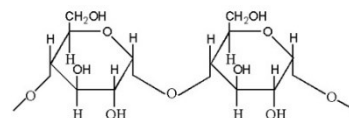
от бактерията *Xanthomonas campestris*. Произвежда се чрез микробна ферментация. Този полимер позволява да бъде използван, както в комбинация с разтвори на бентонитова основа, така и в чисти полимерни разтвори. Ксантановата гума повишава вискозитета и има псевдопластично поведение и средно до ниско влияние върху филтрацията на разтвора. Тя значително подобрява реологичните свойства на промивната течност (повишава носещата способност) и има висока толерантност към хлориди. Ксантановата гума е напълно биоразградим продукт.



Фиг. 5. Полимерна структура на гуар гума (вляво) и ксантанова гума (вдясно)

Гуар гумата е продукт на основата на естествен биополимер – полизахарид, извлечен от семената на растението *Cyamopsis tetragonoloba*. Получава се при смилане на семената на растението гуар. Също както и ксантановата гума, повишава вискозитета на разтвора (по-слабо спрямо ксантановата гума), както и носещата способност. Този полимер има псевдопластично поведение и няма никакво влияние върху филтрацията на разтворите.

Нишестето е продукт на основата на естествен биополимер - полизахарид, получаван чрез извличане и пречистване на зърна и грудки от пшеница, картофи, тапиока, бобови растения, ориз, царевича и др. Тези полимери обикновено са биоразградими, но понякога се прилагат технологии на модифициране, превръщайки ги в стабилни съединения, устойчиви на температурно и бактериално разлагане (фиг.6). Обикновено се получава т.нар. карбоксиметлирано нишесте или окислено нишесте.



Фиг. 6. Полимерна структура на нишесте

Нишестето влияе основно върху филтрацията на разтвора и има минимално влияние върху вискозитета. То е намерило силно ограничено приложение в сферата на ХНС, като подобно на карбоксиметил целулозата се характеризира със слаба разтворимост, както и с необходимостта от неколкостотни по-високите концентрации за постигане на същия ефект върху филтрацията спрямо полианионната целулоза.

Сфери на приложение на безглинести/полимерни разтвори

Безглинестите (полимерни) промивни течности намират все по-широко приложение при ХНС, особено в условия, където традиционните разтвори, базирани върху бентонит, са недостатъчно ефективни или има допълнителни екологични съображения. Те представляват системи, базирани на вода, синтетични полимери,

полусинтетични или естествени биополимери, които осигуряват смазване, охлаждане и транспортиране на сондажния шлам, без да образуват дебела филтрационна кора.

Ключови приложения на безглинестите промивни течности в хоризонтално насоченото сондиране:

- *Сондиране в меки, глинести почви.* Безглинестите течности са силно ефективни при преминаване през реактивни (набъбващи) глинни. Полимерите (като РНРА) обвиват глинестите частици, предотвратявайки набъбването и слепването им по сондажния инструмент.
- *Сондиране в здрави и ненарушени формации.* Безглинестите полимерни разтвори осигуряват почистване на разрушения материал, удържане и намаляване на триенето.
- *Екологично чувствителни зони.* Тъй като безглинестите течности често са биоразградими, те се предпочитат при проекти, в които има специално заложи изисквания, свързани с екологични фактори, (напр. сондиране в защитени зони).
- *Сондиране на къси по дължина и относително малки по диаметър сондажи* (напр. за телекомуникации, ВИК инфраструктура и др.). Безглинестите полимери предлагат по-лесно смесване, транспортиране и утилизация, спестявайки време и разходи.

Предимства и недостатъци на полимерните разтвори

Предимства на полимерните разтвори пред бентонитовите разтвори:

- *По-добра смазваща способност.* Полимерите намаляват триенето, което е критично, както при сондиране, така и при издърпване на продуктопроводите.
- *По-малко отпадъци.* При полимерните разтвори се ползва значително по-малко количество продукти, а оттам и съответно се генерират по-малко отпадъци от опаковките спрямо бентонитовите разтвори. В тази връзка има по-ниски логистичните разходи (транспорт, съхранение), както и цялостния обем на отпадъците на обекта.
- *По-ниско работно налягане.* Поради по-добрата си реология в сравнение с бентонита, те често изискват по-ниско налягане на нагнетяване, което намалява риска от аварии (неконтролирано изливане на сондажния разтвор на повърхността - хидроразриви).

Наред с предимствата и удобствата при използването на подобни продукти, следва да се отчита и тяхното приложение само до определени граници. Тези системи са предназначени предимно за ХНС с малък диаметър и относително къса дължина на сондажните изработки. Полимерните (безглинести) разтвори не могат да осигурят образуването на качествена филтрационна кора и тяхното приложение при несвързани и рихли формации е доста въпросително, както от гледна точка стабилност на сондажите, така и загубите на флуид във формациите.

Основни компоненти за приготвяне на безглинестите промивни течности

Полимери за вискозитет и носеща способност – ксантанова гума и гуар гума, в редки случаи се използва и СМС.

Полимери за контрол на филтрацията – полианионна целулоза (РАС) и понякога полимери на основата на нишесте или СМС.

Полимери инхибитори на глинни – това са полимери като частично хидролизирания полиакриламид, полиакрилати (РНРА) и др.

Повърхностно активни вещества (ПАВ) – влияят върху прилепване на глинни върху сондажния инструмент и по този начин предотвратяват образуването на салнии.

Смазващи агенти – добавки на основата на минерални и синтетични масла и др., които намаляват триенето.

Много често се използват т.нар. “блендове” (предварително смесени продукти, в определени съотношения), които позволяват максимално използване на преимуществата на всеки продукт. Биоразградимите блендове представляват комбинация от ксантанова гума с гуар гума, а в някои случаи и СМС или полианионна целулоза. Небиоразградимите блендове обикновено са на основата на частично хидролизиран полиакриламид (РНРА) в комбинация с полианионна целулоза (РАС) и повърхностно активни вещества. Решението за избор между биополимерни системи или небиоразградима промивна течност зависи от конкретните геоложки условия и екологичните изисквания на обекта. И двата подхода притежават специфични предимства, но също така и ограничения (Duagan G., 2020).

Рециклиране

Процесът на рециклиране представлява почистване на промивните течности, набогатени от просондиран материал/шлам и повторно използване. Това намалява значително разходите, както и отпадъците. Рециклирането зависи от основните съставки, използвани за приготвяне на разтворите. Полианионната целулоза и ксантановата гума (в т.ч. и гуар гума) позволяват рециклиране (до определени граници), както и коригиране на параметрите на разтворите (добавяне на допълнителни реагенти). При частично хидролизирания полиакриламид (РНРА), рециклирането е в пряка зависимост от молекулната маса и дължината на молекулната верига и обикновено рециклиране не е възможно (Anderson M. R., 2013).

При сондиране с биополимери обикновено не се прилага рециклиране, тъй като много често те са обект на разлагане на полимерните вериги под въздействието на биологични, химични и физични фактори, което води до превръщането им в по-прости съединения като вода, въглероден диоксид, биомаса, минерални вещества и др. Факторите, от които зависи процеса на разграждане, са температура, рН на средата, наличие на кислород, микроорганизми, структура на полимера и т.н. Тези процеси биха могли да бъдат забавени посредством добавяване на т.нар. бактерициди, но това прави съединенията частично или не биоразградими. Най-често рециклирането на разтворите преминава през няколко фази – първично отделяне на материал посредством вибросита (очистване на шлам до 74µm), хидроциклони – десандри (очистване на шлам до 44µm) и десилтри (очистване на шлам до 25µm) и в много редки случаи центрофуги (очистване на шлам до около 10µm). Принципа на схема на типична система за рециклиране е представена на фиг. 7.



Фиг. 7. Типична система за рециклиране на промивни течности в ХНС

Заклучение

Използването на безглинести промивни течности е съвременна технология, която намира все по-голямо приложение в сектора на ХНС. Използването на безглинести промивни течности води до намаляване на количеството продукти за приготвяне на разтворите, пониски транспортни разходи за доставката до обекта, почиста работна площадка, намаляване на разходите за изхвърляне на отпадъци. Несъмнено има предизвикателства, които са свързани най-вече с рециклирането на промивните течности на безглинеста основа, тяхната устойчивост на биоразграждане по време на сондиране и съответно тяхната утилизация след завършване на проектите. Необходимо е извършването на задълбочен анализ за усъвършенстване на методиката, с увеличаване на ефективността на процесите и нарастващите екологични предизвикателства.

Литература

- Аризанов, В., Янакиева, С. (1986). *Промивни течности и циментови разтвори в сондирането*. Техника, София.
- Губанов, В., Лопатин, Д., Счев, В. (2006). *Книга инженера по разтворам*. Гарусс, Москва.
- Кистер, Е. Г. (1972). *Химическая обработка буровых растворов*, Недра, Москва
- Тужиков, О. И., Тужиков, О. О. (2016). *Зеленые полимеры*. ВолГТУ, Волгоград.
- Andelman E. Horizontal drilling mud program (<https://www.directionaltech.com>)
- Anderson M. R. (2013). *Principles of Solids Control, Trenchless Technologies*, Oct 2013
- Arumsari, P., Tanuwijaya, E., (2021). Pipeline installation using horizontal direction drilling method (HDD), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021
- Bergstrom H., Al-Muhandis N., Abos P. (2024). Fluid Dynamics in HDD: Flow behavior of drilling fluids, Tunneling and Trenchless technology, Taipei 2024
- Dugan G. (2020). How to I use bentonite -free polymer HDD Drilling fluids, The driller May 2020 (<https://www.thedriller.com/drillingfluids>)
- Imtiaz, A., Ahmad, M., Arain, H. A., Atashbari, V., Zamir, A. (2022). Drilling engineering and technology- recent advantages new perspectives and applications, Utilization of Biopolymers in Water based drilling muds, Chapter 4, IntechOpen London 2022 1-3
- Fink, J. K. (2015). *Water based chemicals and technology for drilling completion and workover fluids*, Guld Professional publishing Elsevier, Oxford 2015 14-16
- Nachman, D., Sousa, R., Xiaoguang, M., Sarkar, D. (2021). *Horizontal Directional Drilling*, New Jersey Department of Environmental Protection.