Научная статья
Original article
УДК 622.24

ЛАЗЕРНОЕ БУРЕНИЕ – РЕАЛЬНОСТЬ ИЛИ ФАНТАСТИКА?

LASER DRILLING-REALITY OR FANTASY

Яляев Анвар Ринатович, Студент 4 курс, факультет «Горно-нефтяной», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа
Маршев Виталий Игоревич, Студент 4 курс, факультет «Горно-нефтяной», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа
Сафиуллина Карина Ильфатовна, Студент 4 курс, факультет «Технологический», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

Yalyaev Anvar Rinatovich, 4th year student, Faculty of Mining and Oil, Ufa State Oil Technical University, Russia, Ufa
Marshev Vitaly Igorevich, 4th year student, Faculty of Mining and Oil, Ufa State Oil Technical University, Russia, Ufa
Safiullina Karina Ilfatovna, 4th year student, Faculty of Technology, Ufa State Oil Technical University, Russia, Ufa

Аннотация: В нефтяной промышленности с момента разбуривания первой скважины широкое применение получили лишь два метода бурения: ударно-канатное и вращательное. Хоть и эти методы все еще развиваются, они имеют множество ограничений и сталкиваются с большим количеством проблем с точки зрения возможности их применения, времени, затрат и безопасности. В

данном исследовании были предприняты попытки конкретизировать каждый метод, выделить его сильные стороны и недостатки. Так, было описано лазерное бурение, являющееся относительно новым, более мощным и эффективным методом бурения, который имеет возможность преодолевать осложнения и обладает существенным потенциалом для достижения того, что считается невозможным при использовании других методов в условиях описанных выше. Исходя из экспериментов, исследований и других проведенных работ, можно заметить, что применение лазерной технологии, в частности в бурении и других сферах нефтяной промышленности, является действенным вариантом, особенно с учетом результатов, достигнутых к настоящему времени.

S u m m a r y: In the petroleum industry, only two drilling methods have been significantly used since the drilling of the first oil well, cable tool and rotary drilling methods. Although still developing, these methods have many limitations and face many obstacles in terms of ability, time, costs and safety. This research attempts to elaborate each method and highlight their point of strength and limitations. In this research, laser drilling is described which is a relatively new and more powerful, efficient method that has the potential to overcome the obstacles and has superior abilities that could achieve what is considered impossible for the other methods in the terms mentioned above. In light of experiments, studies, and efforts we show that applying laser technology to drilling in particular and other parts of the petroleum industry is a viable option, especially when considering what has been achieved so far. Laser drilling seems very promising, it could push the boundaries and revolutionize the way we drill and our achievements in drilling for oil and gas

Ключевые слова: Бурение, конструкция скважины, оборудование, технология бурения, механическая скорость бурения, исследование, разрушение горных пород.

Keywords: Drilling, well construction, equipment, drilling technology, mechanical drilling speed, research, destruction of rocks.

На момент начала 21 века в нефтяной отрасли все еще не преодолены некоторые ключевые проблемы, с которыми приходится сталкиваться в данной сфере. Большое внимание уделяется бурению, поскольку сложность данного процесса не позволяет получать желаемые результаты в кратчайшие сроки. Следовательно, много времени уделяется бурению, иногда недели и даже месяцы для отдельно взятой скважины. «Эдвин Драке пробурил первую скважину в целях добычи нефти в 1859 году в округе Венанго, недалеко от Титусвилля в Пенсильвании». Несмотря на существовавший на то время уровень техники (например, Баку-Азербайджан 1846 г., Германия 1857 г. и Канада 1858 г.), это была одна из первых успешно пробуренных в целях поиска нефти скважин [3].

Она также известна как Скважина Дрейка в честь «полковника» Эдвина Дрейка, который и пробурил ее. Она положила начало международному поиску нефти и изменила ход истории. Скважина Дрейка является первой скважиной, метод бурения которой был поставлен на поток. Бригада Дрейка пробурила ее тем же методом, которым производилось бурение солевых скважин, но при этом использовали паровой двигатель для приведения буровой установки в действие, а также спускали обсадные колонны во избежание обрушения, что позволило им производить бурение на более глубоких горизонтах. В общем и целом, пробуривался 1 метр за один день. Первый приток флюида им удалось получить на глубине (21 м), после бурения с весны до 27 августа. С тех пор многие буровые механизмы были разработаны и модифицированы для достижения лучших результатов. У каждого из них есть свои преимущества и недостатки с точки зрения максимально возможной глубины бурения, скорости бурения, типа поднятой на дневную поверхность выбуренной породы и связанные с этим затраты [7].

На рубеже 20-го века внедрение вращательного бурения произвело революцию в отрасли. Это стало причиной вытеснения раннее популярного ударно-канатного бурения, которое в свою очередь являлось основным методом проведения бурильных работ. Однако такие недостатки как отсутствие точности в вертикальных или наклонно-направленных скважинах, простоя из-за

затупления долот, утечки пластового флюида и отходов в связи с использованием бурового раствора устранены в новом механическом методе бурения не были. С другой стороны, бурение нефтяных и газовых скважин становится все более сложным, к примеру, на данный момент времени мы вынуждены бурить скважины глубиной до 12300 м (Сахалин-1 проект-EXXONMOBIL), зачастую в холодных бурных глубоких водах, для получения высоко прибыльного и удовлетворительного объема добычи.

Следовательно, существует потребность в более эффективном и мощном методе бурения. Хотя первые эксперименты по лазерному бурению были проведены в 1960-х годах, специалисты впервые изучили его применение в нефтяном бурении в 1997 году. Институт газовой технологии (GTI) инициировал двухлетнее исследование в 1997 году для изучения возможности применения мощных военных лазеров в разведке и добыче углеводородов, непосредственно при бурении, а также перфорации нефтяных и газовых скважин. Эксперименты показывают, что лазерное бурение является действенным методом для совершенствования технологий бурения. В частности, в бурении на шельфе, где время простоя из-за затупившегося долота значительно сокращается за счет замены долота на лазерные головки, которые не контактируют с каменным дном. Также при бурении данным методом не образовываются отходы бурового раствора, поскольку лазер герметизирует стену скважины, создавая керамическую оболочку по мере сверления. Отсюда потребность в стальных обсадных колоннах и связанные с этим затраты также снижаются, так как приток/отток флюидов в скважине устраняется, также снижается вероятность обрушения стенок скважины.

Согласно другому исследованию GTI, 50% времени бурения уходит на разбуривания ствола, 25% - на разобщение пласта и 25% на спуск обсадной колонны и цементирование. Вывод: значительного снижения затрат на бурение можно добиться за счет применения более быстрых методов бурения и отсутствия необходимости съема бурильной колонны, замены долот и спуска обсадных колонн. Применение лазерной технологии может решить данную

проблему, поскольку бурение скважины данным методом происходит в 100 раз быстрее, чем при использовании вращательного бурения.

Самые ранние записи о пробуренных скважинах в Китае относятся к 1122 году до н.э. Эти ранние скважины были пробурены для добычи солевых отложений и поставки соли на обширные внутренние территории Китая. Еще в 1940-х годах методы, используемые для бурения глубоких солевых скважин и скважин природного газа в отдаленных китайских провинциях по-прежнему были трудоемкими, почти полностью немеханизированными и зависели от наличия бамбука в качестве основного компонента буровой установки. Буровая вышка состояла из двуногой башни, на которой находился кронблок. В качестве опоры использовались две ноги. Линия подъема и спуска бурильной колонны проходила через шкив и возвращалась к большой горизонтальной катушке, вращаемой волами, идущими по кругу. Возвратно-поступательное ударное движение производилось силой человека. Длинная жесткая горизонтальная планка служила рычагом с бурильными инструментами, прикрепленными к короткой стороне оси; бригада рабочих по очереди поднимала бурильную колонну запрыгнув на противоположный конец доски. Когда рабочие спрыгивали, инструмент падал на забой скважины под собственным весом. Небольшая команда правильно синхронизированных прыгунов могла выполнять эти действия со скоростью от двадцати до сорока ударов в минуту. Буровая линия была сделана из гибких бамбуковых полос длиной около 40 футов (12 метров). Полоса была надрезана и стянута прочным конопляным шнуром и сыромятной кожей. Одина полоса была достаточно прочной для того, чтобы выдерживать инструменты на глубине до 1500 футов (457 метров). Далее для сверления использовалось несколько полос. Бамбуковая веревка не использовалась в качестве бурового каната из-за чрезмерного растяжения не смотря на то, что она широко использовалась в полевых условиях для решения других задач. Бурение на больших глубинах с использованием данного метода было долгосрочным и довольно дорогостоящим проектом. Чтобы пробурить скважину глубиной 4000 футов (1219 метров) требовалось около четырех лет и

ее себестоимость была эквивалентна 17000 долларам на момент 1923 года (вероятно, в десять раз больше по сегодняшней долларовой стоимости). В этот метод были внесены некоторые заметные улучшения, такие как использование тонкого гибкого бамбука вместо твердого толстого, это произошло примерно в 1050 году нашей эры, также были испытаны металлические долота различных форм [8].

Основной принцип, применяемый при работе с ударно-канатным бурением, практически не изменился с момента его появления в Китае в первые дни христианской эры. Дрейк и Смит использовали паровую установку для ударно-канатного бурения скважины Ойл-Крике в Пенсильвании. Первые бурильщики в Калифорнии и других местах также использовали данные установки. Принцип ударно-канатного бурения такое же, как и на детских качелях. Когда ребенок оказывается на каждом конце хода качелей, он поднимает их вверх и вниз. Качающееся движение демонстрирует принцип ударно-канатного бурения [2]. Тяжелое, остроконечное долото может медленно пробиваться сквозь породу, шаг за шагом, с каждым ударом. Установка для ударно-канатного бурения работает как качели балансиром, установленным на вышке. Балансир – это деревянная перекладина, которая качается вверх и вниз на центральной оси. На буровой установке Дрейка паровой двигатель мощностью 6 лошадиных сил (4,5 кВт) приводил в движение балансир. Когда балансир поднимается, он поднимает трос, прикрепленный к долоту. Затем, когда балансир опускается вниз, утяжелители над долотом, называемые ударными штангами, создают на него весовую нагрузку в целях последующего врезания долота в землю. Долото пробивается в горную породу, и повторяющиеся спуск и подъем позволяют долоту пробуривать породу. Бурильщик постепенно спускает кабель по мере того, как происходит углубление. На вышке также имеется место для поднятия троса и извлечения длинных бурильных инструментов из скважины с помощью одной из нескольких лебедок, называемых главными барабанами.

Вращательное бурение было впервые применено при бурении нефтяных скважин в 1901 году Энтони Лукасом и Патилло Хиггинсом в скважине Spindletop в Техасе. К 1925 году метод вращательного бурения был усовершенствован за счет использования дизельного привода. При первой попытке бурения данным методом использовалось устройство, которое направляло поток промывочной жидкости во внутреннюю полость долота для удаления шлама. В этом и состояло отличие от ударно-канатного бурения, при котором бурение приходилось прерывать и удалять шлам перед тем, как продолжать операцию. Первоначально роторный бур использовался для буренiz в более мягких породах в таких областях, как Калифорния и побережье Мексиканского залива; однако это изменилось с производством шарошечных и конических долот из стального сплава. Это нововведение сделало роторное бурение подходящим для более твердых пород, и в конечном итоге оно использовалось для бурения глубоких скважин. Роторное бурение стало незаменимым для нефтяной отрасли, поскольку благодаря нему можно осуществлять бурение скважины меньшего диаметра по сравнению с ударно-канатным методом. Это стало возможным благодаря тому, что ствол скважины, пробуренный роторным сверлом, имел одинаковый диаметр как на забое, так и на устье. Вращательное бурение внесло множество улучшений в систему бурильных работ. Оно также является крайне важной составляющей при производстве цементного раствора для нефтяных скважин. Благодаря роторному бурению стало возможным осуществлять непрерывный спуск большого количества цемента, необходимого для строительства скважины. Ранее при бурении нефтяных скважин, ударно-канатным или ударным методами возникало большое количество осложнений, таких как аварийный нефтяной фонтан, приводивший в последствии к пожарам и потере ценной нефти. Проблемы, возникающие в результате наличия избыточного давление в нефтяных скважинах, удалось устранить с применением вращательного бурения. Базовая система роторного бурения состояла из главных приводов, подъемного, вращающегося и промывочного оборудований. Несмотря на то, что эта система

была базовой, она также была сложной. Изначально ее привод осуществлялся паровыми двигателями. После второй мировой войны такие установки были оснащены бензиновыми, а затем и дизельными двигателями. Наличие у роторного бура автоматической подачи промывочной жидкости для удаления шлама (через циркуляционную систему промывки) позволяло оператору не прерывать процесс бурения как это приходилось делать при ударно-канатном бурении. Это также снижало вероятность того, что буровой раствор станет причиной осыпей и обвалов в скважине. Существуют различные технологии вращательного бурения [1].

Базовая технология роторного бурения включает в себя вращение острого бурового долота и врезания его в горную породу. Благодаря системе, состоящей из главных двигателей, подъемного, вращательного и промывочного оборудования, такая установка исключает различные осложнения при эксплуатации. Наиболее распространенным приводом для установок роторного бурения является дизель. Помимо этого, используются газовые приводы, двигатели, работающие на природном газе, а также поршневые двигатели внутреннего сгорания, способные вырабатывать энергию непосредственно на месторождении. Энергия передается от данный главных приводов к роторному, подъемному и промывочному оборудованию. На более крупных буровых установках энергия может также подводиться для смесительных, компрессорных установок и освещения. Подъемное оборудование роторной системы бурения используется для подъема и спуска породоразрушающего инструмента. Подъемное оборудование состоит из буровой вышки, которая расположена над прямоугольной конструкцией из стальных Т-образных балок; она также имеет стальной пол, по которому можно осуществлять передвижение – так называемая "фундамент". Подъемная конструкция, помимо размещения буровой вышки, служит опорой для тросов и шкивов, которые поднимают и опускают инструмент. Подъемное оборудование необходимо, так как долото может иногда весить тысячи фунтов. Высота подъемного оборудования помогает стабилизировать систему. Оно также поддерживает двигатели и полиспаст,

которые являются механизмом, удерживающим и управляющим кабельными барабанами, которые обеспечивают работу подъемников и вертлюгов. Роторное оборудование – это, по своей сути, часть оборудования, с приводом от основного двигателя, которое вращает буровое долото. В свою очередь, вертлюг, который крепится к подъемному устройству, обеспечивает поддержку веса бурильной колонны таким образом, чтобы она могла вращаться непрерывно. Внутри скважины колонна спускается вплоть до бурильных труб, достигая долота, отвечающего за разрушения горной породы. Скважины пробуриваются длинными колоннами бурильных труб, которые простираются от устья к долоту. По мере того, как ротор вращает буровое долото, скважина становится все глубже и глубже. При этом бурильная колонна вынимается в 20-футовых (6,1 м) секциях (по мере того, как они свинчиваются, происходит наращивание колонны бурильных труб вниз по стволу). Циркуляционная система промывки отвечает за охлаждение и смазку бурового долота для поддерживания его оптимальной производительности. Кроме того, циркуляционная система промывки удаляет шлам и покрывает стенки скважины глинистой коркой для облегчения циркуляции промывочной жидкости. Роторное буровое долото расположено на забое бурильной колонны. Именно породоразрушающий инструмент контактирует с горной породой и осуществляет бурение скважины. Это происходит за счет разрушения и выноса горной породы [9].

Существует множество типов буровых долот, предназначенных для облегчения разбуривания пластов различной степени твердости. Ниже приведены три основных типа буровых долот:

– Лопастное долото состоит из стали и карбида вольфрама. Данная комбинация обеспечивает режуще-скалывающее действие, которое применяется для бурения рыхлых, мягких пластов.

– Шарошечное стальное зубчатое долото было изобретено в 1900-х годах и являлось одним из наиболее распространённых типов буровых долот для всех проектов по бурению. Долота, вооруженные длинными зубками, использовались для более мягких пластов, в то время как с долото с короткими

зубками для твердых. Данное вооружение обеспечивает дробяще-режущее действие, осуществляемое путем дробления и измельчения горной породы. В последнее время при бурении абразивных пород вместо обычного гранита или кварцита используется карбид вольфрама.

– Поликристаллическое алмазное долото состоит из алмазных резцов, прикрепленных к твердосплавной рабочей поверхности. Они подходят для самых твёрдых пластов; являются более эффективными и в 40-50 раз более твердыми, по сравнению с традиционными стальными долотами. В отличие от ударного или ударно-канатного бурения, при которых используются долота, вращающиеся только на забое скважины, при роторном бурении создается нисходящее давление и долото вращается на протяжении всей длины скважины вплоть до ее забоя. Для успешного завершения этой операции роторное оборудование работает в тесном контакте с подъемным и промывочным оборудованием; по мере того, как долото, вращаясь, спускается в скважину, промывочное оборудование очищает забой от шлама. При роторном бурении иногда используются долота, которые устанавливаются на грузовики или гусеничный транспорт. Этот вид бурения позволяет пробурить отверстия диаметром до восьми дюймов (200 мм) и глубиной от 328 до 656 футов (от 100 до 200 м). Для более глубокого бурения требуется роторная буровая установка. С помощью этого типа бурения можно просверлить отверстия глубиной до 19 685 футов (6 000 м). Роторные буровые установки отличаются от передвижных установок тем, что они больше полагаются на гидравлические и талевые системы для подъема бурильной колонны [17].

Разрушение и вынос горной породы является существенной проблемой в процессе разработки нефтяных и газовых месторождений. За эти годы были извлечены миллиарды кубометров горной породы с огромными капитальными вложениями. В 1999 году в США на суше было пробурено около 20 000 скважин глубиной около 1830 метров и стоимостью около 15 миллиардов долларов. Это эквивалентно приблизительно 37 000 километрам, что почти в три раза больше диаметра Земли (12 756 метров). Лазерная технология, применяемая при бурении

и заканчивании скважин, позволяет сократить время бурения, исключить необходимость удаления и утилизации бурового шлама и повысить производительность скважин за счет улучшения перфорационных работ.

Лазерное расщепление горной породы – это процесс удаления горной породы, в котором используется создаваемое лазером тепловое напряжение для разрушения горной породы на небольшие фрагменты вплоть до начала плавления породы. Исследования по бурению нефтенасыщенных пород лазерами показывают, что современные инфракрасные лазеры способны дробить (термически фрагментировать), плавить и испарять природные земные материалы, причем термическое дробление является наиболее эффективным механизмом удаления горной породы. Хоть лазерное излучение в 1000 Вт/см² и является достаточным для дробления породы, обстрел луча в одном месте в течение слишком долгого времени при такой интенсивности вызывает плавление породы и снижает эффективность её удаления [14]. Кроме того, сложно представить эффективный способ создания шести- или восьмидюймового отверстия, направляя при этом лишь один большой луч в скважину. Альтернативой может быть либо растрирование луча для покрытия 20-сантиметрового отверстия, либо, используя рисунок из множества маленьких лучей, освещенный ими последовательно или группами, создать почти что круглую рабочую поверхность. Энергия лазера высокой интенсивности, направленная на горную породу, которая обычно имеет очень низкую теплопроводность, концентрируется локально на поверхности горной породы и мгновенно вызывает местное повышение температуры. Максимальную температуру, не превышающую температуру плавления, можно получить, тщательно контролируя параметры лазера. Это приводит к локальному тепловому напряжению в подземных слоях, которого достаточно для расщепления породы. Этот процесс продолжается на нижележащей слоях горной породы с помощью продувки газом под высоким давлением, благодаря чему выносятся разрушенные фрагменты породы.

С 1997 года команда, состоящая из участников Института газовых технологий (GTI, бывший Институт газовых исследований), Горной школы штата Колорадо, Национальной лаборатории Аргонны и компании Parker Geoscience Consulting, LLC, изучает целесообразность использования мощных инфракрасных лазеров для создания нефтяных и газовых скважин. Требования, предъявляемые к такой системе, будут включать возможность создания скважины диаметром около 20 см и более, которая проникает на глубину до 6000 метров и далее в нижележащие пласты. К породам, встречающимся при бурении нефтяных и газовых скважин, относятся сланцы - тип горной породы, характеризующийся скорее мелкозернистостью, чем тем, какие минералы составляют породу; песчаник, состоящий из зерен преимущественно 62 мкм и более; известняк, являющийся в первую очередь карбонатом кальция. Сланцы являются наиболее пробуренным типом горных пород - 70% от общего количества. Другие типы пород, такие как граниты и мрамор, бурятся гораздо реже [10].

Существует множество типов лазеров, CO_2 Лазер – это высокомощный лазер, который был протестирован для применения в нефтяной промышленности. В 1997 году Институт газовой технологии инициировал двухлетнюю исследовательскую программу и успешно продемонстрировал возможность использования высокомощных лазеров для бурения и заканчивания нефтяных и газовых скважин. Основываясь на этом, Министерство энергетики США профинансировало следующую фазу для более полного исследования основных научных принципов, которые могут сделать концепцию лазерного бурения и заканчивания работ доступной для разработки прототипа, который мог бы использоваться в промышленности. В рамках фундаментальных научных исследований было изучено влияние длины волны лазерного луча на удаление горной породы. Изучены две длины волн: 10,6 мкм от 6 кВт лазера CO_2 и 1,06 мкм от 1,6 кВт импульсного Nd:YAG лазера. Высокомощные углекислые лазеры на протяжении многих лет успешно используются для сверления или резки инженерных материалов, таких как металлы, полимеры и керамика.

Исследование, спонсируемое Министерством энергетики США, показало, что для проведения испытаний использовался лазер мощностью 6 кВт CO_2, работающий в суперхимпульсном режиме. На горных породах производились как линейная резка, так и создание глубоких отверстий. Была определена энергия, необходимая для удаления единичного объема горной породы – удельная энергия. Результаты испытаний показали, что сверхимпульсный лазерный луч CO_2 может быть эффективно использован для бурения глубоких скважин крупного диаметра в нефтенасыщенных породах с помощью газовой продувки.

Любой метод бурения нефтяных скважин должен отвечать определенным требованиям, так как бурение на нефть значительно отличается от бурения для любых других целей. Метод бурения нефтяных скважин должен включать в себя и быть способным в достаточной степени выполнить следующее: достижение высоких скоростей проходки, разрушения и гидроразрыва пласта, который бурят с учетом времени, мощности и затрат. Также он должен обладать возможностью извлечения шлама с забоя скважины с учетом времени и затрат. Выбранный метод бурения должен предотвращать обрушение скважины. Он должен быть хорошо оснащен, чтобы контролировать обвалы, это особенно важно, поскольку от этого зависит безопасность рабочих, а безопасность – это самое важное и главное где бы то ни было.

Метод ударно-канатного бурения достаточно простой, он характеризуется использованием тяжелого металлического долота, прикрепленного к инструменту (колонне), подвешенной на тросе, его многократно поднимает вверх и затем вдавливают в грунт для разрушения горных пород на забое, долото изготовлено из армированного металла, тросы также представляют собой металлический кабель. Кабель устанавливается на буровой установке и приводится в движение электродвигателем.

Как и во многих других способах бурения, для предотвращения обрушения скважины используется обсадная колонна, что несомненно помогло усовершенствовать данный метод во многих отношениях. Долото врезается в

горную породу за счет электропривода или же под действием силы тяжести бурильный колонны и долота. Этот метод был разработан в Китае 3000 лет назад, и хоть он похож на китайское бурение бамбуком, в нем, конечно же, наблюдаются значительные улучшения, и в некоторых случаях он используется по сей день [13]. Система выноса шлама при использовании этого метода требует удаления долота из скважины и, следовательно, приводит к простою, это происходит, когда количество выбуренного шлама увеличивается, а скорость продвижения снижается, шлам с водой образует суспензию, которая вынимается желонкой, которая спускается в скважину вместо бурильной колонны и долота (рис. 1). После этого процесс бурения возобновляется. Попытки разработать эффективную промывочную систему для ударно-канатного бурения с некоторым успехом предпринимаются такими компаниями, как (ATLAS COPCO).

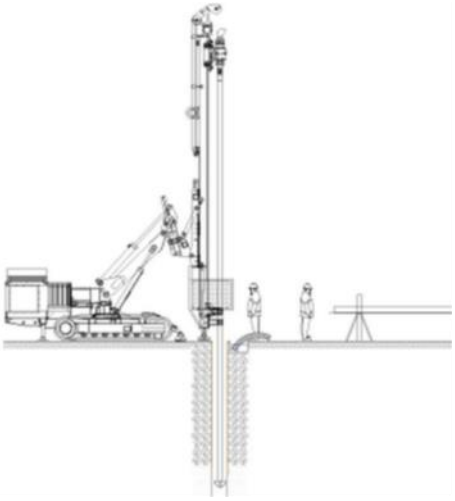

Рисунок 1 - Ударно-канатное бурение [16]

Преимущества ударно-канатного бурения:

1- Система является автономной и не требует большого количество работ, большинство установок эксплуатируются тремя и менее операторами.

2- Относительно низкая стоимость во многих отношениях.

3- Не требует большого количества воды, поэтому подходит для работы в маловодных районах.

Недостатки ударно-канатного бурения:

1- Низкая механическая скорость бурения (ROP).

2- Низкие показатели бурения по скорости, глубине и т.д.

3- Относительно низкая производительность за единицу времени.

4- Внедрение противовыбросового оборудование при данном способе бурения является крайне сложной задачей, при этом оно не столь эффективно как при вращательном бурении.

Нехватка опытного персонала, так как вращательное бурение является основным методом бурения в нефтяной промышленности.

6- Невозможность бурения большого количества продуктивных пластов по сравнению с роторным методом.

7- Раньше наклонно-направленное бурение данным методом было невозможно, теперь же новые технологии позволяют это осуществить, однако статистика показывает малую эффективность этого мероприятия по сравнению с вращательным бурением, поэтому оно не применяется ни для нефтяных, ни для газовых скважин.

8- Высокая вероятность обрушения скважины в неконсолидированных, мягких пласта, поэтому спуск обсадных труб необходимо осуществлять совместно с процессом бурения.

Вращательное бурение. Роторное бурение произвело революцию в области бурения скважин, что стало огромным преимуществом, в частности, для нефтяной промышленности. Наряду с системой циркуляции жидкости, которая была изобретена братьями Бейкер из Южной Дакоты в 1880-х годах, оно стало самым популярным методом бурения к началу 20-го века, что весьма очевидно, так как данный метод обеспечивал высокую механическую скорость бурения, высокую скорость проходки, стабильность и многие другие особенности, которыми на тот момент не обладал ни один другой метод. Роторное бурение появилось намного раньше 20-го века, так, первая задокументированная конструкция роторного бурения принадлежит Леонардо да Винчи: еще в начале 1500-х годов он создал гениальные конструкции вращающегося бурового долота, деревянной обсадной колонны, талевой системы, лебёдки и дифференциального редуктора [4].

Несмотря на простоту этих конструкций, они заложили основу для современной роторной буровой установки наряду со многими другими важными областями. На рисунке изображены конструкции вращающихся буровых долот да Винчи (рис. 2). Он также изобрел буровое долото с алмазным наконечником, идентичное современному. Дизайн и инновации Да Винчи были слишком продвинутыми для того времени, поэтому и не приобрели особую популярность. С быстрым развитием ударно-канатного метода бурения о вращательном бурении скважин забыли. Однако спустя годы после изобретения братьями Бейкер в 1880-х годах системы циркуляции жидкости и роторной буровой установки оно стала самым распространенным методом бурения в большинстве стран мира, и сейчас это единственный метод, отвечающий требованиям нефтяной промышленности, так как перед ним стоят самые большие задачи.

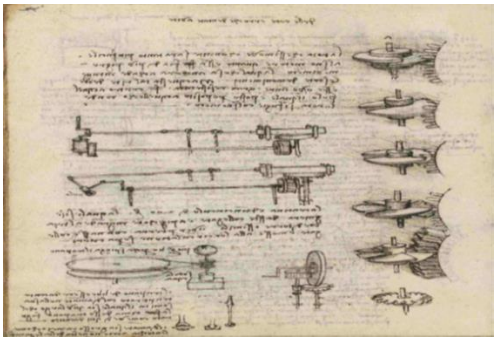

Рисунок 2 - Конструкции вращающихся буровых долот да Винчи [12]

Преимущества вращательного бурения:

1- Высокая механическая скорость бурения (ROP).

2- Бурение возможно в большинстве типов пластов.

3- Гораздо большая производительность за меньшее время.

4- Данный метод позволяет эффективно вести бурение ниже уровня моря.

5- Циркуляционная система промывки поддерживает пласт, и снижает вероятность обрушения скважины.

6- Редкая или малая утечка пластовой жидкости за счет циркуляции бурового раствора.

7- Возможно бурение на больших глубинах.

8- Успешное осуществление наклонно-направленного бурения.

Недостатки ротационного бурения:

1- Высококапиталоемкий процесс.

2- Эксплуатация и техническое обслуживание имеют решающее значение и должны быть выполнены с осторожностью.

3- Необходим большой объем воды.

4- Система промывки требует большого количества оборудования и производит большое количество отходов.

5- Буровой раствор необходимо смешивать и подбирать с особой тщательностью и компетентностью.

6- Простой промывочной системы в некоторых случаях может быть серьезной проблемой, поэтому необходим тщательный мониторинг всех компонентов системы промывки.

Лазерное бурение. Потенциальные лазеры для разрушения породы впервые были рассмотрены в 1997 году доктором Романой Гравис из (Колорадская школа шахт) кафедры нефтяной инженерии CSM, она обнаружила, что лазеры могут выполнять основные работы по разрушению породы, с тех пор было проведено множество исследований по применению лазеров в нефтяной промышленности в целом и в бурении в частности. Использование мощных промышленных и военных лазеров показало, что лазерное бурение является жизнеспособным вариантом для нефтяной промышленности, который потенциально может сэкономить много времени и денег, а также снабдить промышленность необходимой энергией и инструментами для решения беспрецедентных проблем, с которыми она сталкивается в современную эпоху [11]. Многие игроки на рынке нефтедобывающей промышленности заинтересованы в разработке более эффективных механизмов бурения, и многие из них рассматривали и проводили исследования и эксперименты по изучению возможности применения лазеров для бурения в различных пластах. Среди них Институт газовых технологий (GTI), который является ведущим исследователем в этой области, Колорадская шахтная школа (CSM) и Национальная лаборатория Аргонны - все они внесли большой вклад в развитие нефтяной промышленности,

в частности доктор Клод Б. Рид и д-р Рома Грейвс. а лидеры промышленности Шлюмберже и Halliburton проявляют большой интерес к этой области. В первой работе над этим проектом, финансируемой GRI (ныне GTI), использовались мощные лазеры, разработанные военными для "Инициативы по защите от звездных войн". Подразделение HELSTF армии США в Уайт-Сэндс, ЯМ, разрешило доступ к 1,6-мегаваттному среднеинфракрасному усовершенствованному химическому лазеру (MIRACL), ВЧ-лазеру, работающему в режиме непрерывной волны (CW) на длине волны 3,4 мкм.

Объект ВВС США в Киртланде, в Альбукерке, NM спонсировал серию тестов на 7-киловаттном химическом кислородно-йодном лазере (COIL), также работающем на длине волны 1,34 микрона, также в режиме CW. Третья серия тестов была проведена на CO2 лазерах 150 кВт и 50 кВт на установке LMHEL в Wright-Patterson AFB в Дейтоне, штат Огайо. Оба лазера работали в CW-режиме на длине волны 10,6 мкм. Испытания были довольно качественными по своей природе, хоть и изначально не было определено то, какое количество энергии потребовалось бы для бурения тех типов пород, которые обычно встречаются при бурении нефтяных и газовых скважин. В результате испытаний были сделаны три основных вывода:

- Современные лазеры большой мощности имеют более чем достаточную мощность, чтобы расщеплять (разрушать), плавить и испарять все типы горных пород.
- Все типы пород требуют примерно одинакового количества энергии для разрушения
- Расплав, созданный с помощью энергии лазера, обладает характеристиками, скорее похожими на прочную керамику, чем на хрупкое стекло [6].

Для количественного определения необходимой для проведения работ энергии значение удельной энергии было описано как количество энергии, необходимое для удаления удельного количества горной породы. Следующая

серия испытаний, финансируемая Министерством энергетики (DOE) на основе соглашения о совместной работе, преследовала следующие цели:

1) Определить абсолютную удельную энергию для песчаника, сланца и известняка.

2) Проверить эффект использования лазеров в импульсном режиме в дополнение к CW-режиму. Испытания проводились на Nd:YAG лазере мощностью 1,6 кВт (длина волны 1,06 мкм) и CO2 лазере мощностью 6 кВт (длина волны 10,6 мкм) в Laser Applications Facility, Аргонская Национальная Лаборатория [15].

Было решено, что будущая тестовая конструкция должна быть модифицирована, чтобы свести к минимуму вторичные эффекты. Количество материала, удаляемого каждым лазерным выстрелом, должно было быть достаточным для измерения, при этом отверстие должно было быть шире, нежели глубже, чтобы обеспечить эффективную продувку. Результаты серии тестов 2001 года были очень обнадеживающими. Значения удельной энергии для всех типов горных пород снизились, причем больше всего снизились значения удельной энергии для глинистых пород, даже когда обработанная лазером горная порода входила в зону плавления. Однако с началом плавления значения удельной энергии снова увеличились, что свидетельствует о необходимости предотвращения плавления для эффективной резки.

Новая серия тестов дала четыре важных положительных результата:

1- Отверстия, полученные в результате мультилучевых тестов, не показали заметного плавления несмотря на то, что значения удельной энергии увеличивались с увеличением числа повторений.

2- Увеличение времени релаксации замедлило увеличение удельной энергии с увеличением числа повторений.

3- Развитие складок было незначительным даже при отсутствии перекрытия соседних участков.

4- Гексагональный рисунок оказался довольно эффективным для удаления значительного количества порода.

Также были обнаружены некоторые отрицательные результаты:

1- Отверстия сужаются по мере увеличения глубины несмотря на то, что луч был коллимирован.

2- Значения удельной энергии были значительно выше, чем в предыдущих тестах по оптимизации работы устройства, и увеличивались с увеличением числа повторений, что свидетельствует о том, что пробуренные отверстия, хоть и были относительно большими, они все еще оставались достаточно узкими и глубокими, чтобы вторичные эффекты стали значительными.

Как отмечалось в результатах выше, значения удельной энергии были значительно выше по сравнению с "оптимальными", выполненными при единичном применении энергии лазера. Причина этого в настоящее время до сих пор не ясна. Одно из объяснений результата связано с конфигурацией используемых лазерных систем. Недостатки оборудования таковы, что испытания все еще не удовлетворяют требованиям, необходимым для промышленного применения оборудования. Система продувки в нынешней конфигурации направляет поток газа в центр отверстия под углом из двух трубок рядом с лазерной головкой. Это необходимо для улавливания частиц в луче, а также для их выдувания из горной породы. Важность системы очистки заметна там, где трубки находятся под разными углами, или лишь одна трубка дует под углом к лучу. В таких случаях отверстие становится асимметричным, что свидетельствует о том, что газ способствует разрушению лучом породы.

Другое вероятное объяснение заключается в том, что с увеличением числа повторов дыра становится достаточно глубокой, чтобы вторичные эффекты, обсуждаемые во "Введении", стали значительными. По мере того, как скважина разбуривается путем добавления точек освещения, значения удельной энергии могут быть уменьшены до приемлемого уровня для эффективного создания ствола скважины.

Общее впечатление заключается в том, что лазерная технология доказала возможность ее применения при бурении и при постоянном развитии лазерной технологии и волоконной оптики; большая эффективность в применении

данного метода бурения возможна, и лазеры могут создавать более гладкие и лучше контролируемые скважины. На следующем рисунке показана пробуренная лазером скважина.

Лазерная технология имеет и другие преимущества для нефтяной промышленности, однако еще одним важным процессом является перфорация, перфорация - это процесс создания отверстий в обсадной колонне, цементе и породе-коллекторе, позволяющий нефти проникнуть в ствол скважины. На колонну устанавливаются заряды взрывчатых веществ, и на заданной глубине заряды взрываются, в результате чего в обсадной колонне, цементе и породе-коллекторе происходит перфорация, а нефть или газ проникают в ствол скважины.

Проблема заключается в том, что эти взрывы часто приводят к повреждению скважины, снижению проницаемости и, соответственно снижению притока нефти или газа в скважину, также взрывчатые вещества создают серьезные проблемы с безопасностью при проведении данных работ. Эксперименты, проведенные доктором Клодом Ридом и доктором Чжиюэ Сюй, доказывают, что использование лазерной технологии для перфорации имеет огромные преимущества перед традиционным методом использования взрывчатых веществ. Так, данные испытаний показывают, что использование лазера Nd: YAG в процессе перфорации увеличивает проницаемость песчаника на 500%, и в зависимости от типа пласта, к примеру, в известняке, лазерная перфорация может увеличить проницаемость, по крайней мере, на 20-170%. Кроме того, использование лазера позволяет контролировать размеры и формы перфорационных отверстий, а также более точно определять места перфорации [5].

В 2014 году компании FORO Energy удалось добиться устойчивого темпа бурения в сверхтвердых породах и разработать долото, являющееся связкой долота PDC и высокомощной лазерной технологией, а с текущими непрерывными исследованиями лазерное бурение становится все более перспективным методом бурения скважин.

Преимущества лазерного бурения:

1- Использование данного метода бурения гораздо безопаснее, так как лазер можно контролировать со скоростью света.

2- Данный метод является более точным, так как лазер может быть направлен с точностью до миллиметра.

3- Более быстрое разрушение пород (в 2-4 раза).

4- Более высокая механическая скорость бурения (ROP) (в 2-4 раза).

5- Создается керамическая оболочка, которая герметизирует стенку скважины, что предотвращает обрушение скважины.

6 – Отходы, связанные с буровым раствором, отсутствуют, так как буровой раствор в данном методе не используется.

7- Устраняется утечка пластовой жидкости в скважине.

8- Для бурения требуется в 2-4 раза меньше времени

9- Требуется крайне низкая нагрузка на долото (<500 кг) и очень низкий крутящий момент (<450 Н•м).

10 Отсутствие проблем с износом долота и, следовательно, отсутствие прихвата рабочего инструмента и времени простоя

11- Гораздо больший срок службы долота

12- С использованием лазера снижаются осложнения при наклонно-направленном бурении.

13- Такое бурение гораздо менее капиталоемкое, затраты на волоконные лазеры снизились с 1000 $/Вт до менее 50 $/Вт за последние 15 лет.

На сегодняшний день использование лазерных технологий и энергии мощных лазеров является вполне доступным; возможно, это ответ на многие проблемы бурения и нерешенные вопросы, с которыми сталкивается сегодня нефтяная промышленность. Лучший метод бурения на сегодняшний день –это роторное бурение, которое хоть и является эффективным и весьма мощным, но все же имеет множество проблем с точки зрения стоимости, безопасности, расхода ресурсов, невозможности бурить некоторые важные горизонты. Также существуют небольшие, но важные отклонения и неточности, временные

затраты, сложности при наклонно-направленном бурении и т.д. Эти проблемы существуют наряду со многими другими, такими как высокий спрос, более высокие требования к бурению, потребность в более глубоких скважинах и бурении в осложненных пластах, все это представляет большие сложности для нефтяной промышленности. Лазерное бурение до сих пор было очень многообещающим в свете многочисленных экспериментов и исследований, которые имели место в последние годы, и при постоянном развитии лазерной техники правительствами разных стран (в основном военными и экологическими ведомствами) бок о бок с большим вниманием со стороны частного сектора, лазерная техника стала быстро развивающейся отраслью, и теперь, когда передача лазерной энергии на очень большие расстояния возможна, лазерное бурение может стать решением многих наших проблем.

Учитывая, что лазерное бурение не нуждается в наличии движущихся деталях в отличие от роторного бурения, при котором вращается вся колонна, что можно осуществлять передачу данных на большие расстояния по высокоразвитой и постоянно совершенствующейся волоконно-оптической технологии, а также учитывая, что параметры лазерного бурения, способствующие разрушению породы (ширина импульса, частота повторения импульсов, размер пятна луча, время релаксации луча, скорость вращения, конфигурация продувочного газа и скорость потока газа) значительно меньше параметров, которые учитываются при роторном бурении, и при этом осуществление их контроля заметно проще, можно с уверенностью сказать, что лазерное бурение имеет огромный потенциал, особенно если учесть, что, как уже упоминалось ранее, в 2014 году было достигнуто устойчивое бурение с высоким качеством.

Гораздо более низкая стоимость, меньшие требования, лучшая безопасность, значительное сокращение времени, меньшее потребление ресурсов, бурение сверхтвердых пород, таких как базальт и гранит, бурение которых сложно осуществлять даже при роторном бурении, и, кроме того,

гораздо более экологичный процесс бурения и заканчивания, и т.д. - все это факторы делают лазерное бурение достойным вашего внимания.

На данный момент испытания и исследования доказали, что лазеры могут бурить с высокой механической скоростью, с высокой скоростью проходки и с высокой эффективностью. Помимо этого, мощность лазера может передаваться на очень большие расстояния с небольшими потерями. Также было достигнуто устойчивое лазерное бурение сверхтвердых пород, известно, что лазерные технологии быстро совершенствуются, и что они могут осуществлять бурение в породах любого типа. Всему этому сопутствуют крайне незначительные проблемы, такие как наличие жидкостей между лазерным лучом и породой. В заключение следует отметить, что лазерное бурение достойно дальнейшего изучения и развития, и, если ему уделять больше внимания со стороны государственных ведомств и ведущих компаний отрасли, лазерное бурение может революционизировать бурение в нефтяной промышленности.

Литература

1. Akpedeye K.U. (2010) Advancement on Drilling Technology in Petroleum Industry.
2. Bais P.S. (1994) Drilling Operations Manual.
3. Bommer P. (2008) A Primer of Oilwell Drilling.
4. Cameron (2014) Drilling Products Overview.
5. Crowther, J. (2001) Advanced drilling systems. 8th re.
6. Eberle J., Persons J.L. (1987) Appropriate Well Drilling Techniques: A Manual for Developing Countries.
7. Gas technology institute (2011) Balancing the Energy Equation Supply demand.
8. Helgestad D.E., (2010). The Drilling Process: A Plantwide Control Approach.
9. International assiciation of drilling contractor (2000) IADC Drilling Manual.
10. Kopey B. (2007) Development of Drilling Technics from Ancient Ages to Modern Times.

11. O’Brien D.G., Graves R.M. (1998) Starwars Laser Technology Applied To Drilling and Completing Gas Wells.
12. Parker R., Leong K.H., Xu Z., Reed C.B., Graves R.M. (2003) Application of High Powered Lasers to Perforated Completions.
13. Rabia H. (حسين ربيعة) (2002) Well Engineering and Construction.
14. Rad A.G. et al. (2014) The Effects of Carbon Dioxide Laser Irradiation on Drilling of Limestone Included Crude Oil.
15. Reed C.B., XU Z. (2009) Methods of Using a Laser to Perforate Composite Structures of Steel Casing, Cement and Rocks. Argonne National Laboratory.
16. Skinner N., Reed C.B., Konercki G., Parker R.A., Gahan B.C., Batarseh S., GRAVES R.M., Figueroa (2003) Specific Energy for Pulsed Laser Rock Drilling.
17. Xu Z., Reed C.B., Parker R., Graves R. (2004) Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling.

© Яляев А.Р., Маршев В.И., Сафиуллина К.И. 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.

Для цитирования: Яляев А.Р., Маршев В.И., Сафиуллина К.И. ЛАЗЕРНОЕ БУРЕНИЕ – РЕАЛЬНОСТЬ ИЛИ ФАНТАСТИКА?// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.