

Казанский Федеральный Университет
Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов
Kazan Federal University,
Department of high-viscosity oils and natural bitumen

Газовые лазеры для очистки водных поверхностей от нефтяных загрязнений
Gas lasers for cleaning water surfaces from oil pollution

Гашпар Фелисиану Гомеш, Feliciano Gomes Gaspar¹

Баймагамбетов Александр Игоревич, Baimagambetov Alexander²

Валиев Динар Зиннурович, Valiev Dinar Zinnurovich³

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich⁴

Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich⁵

магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов¹

магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов²

старший преподаватель кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов³

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов⁵

УДК 553.9. Шифр научной специальности ВАК: 1.4.12. «Нефтехимия»

E-mail: felicianogaspar68@gmail.com

Аннотация: цель данной работы: ознакомиться с газовыми лазерами, историей их создания и дальнейшим применением на промыслах. Газовые лазеры представляют собой перспективный инструмент для очистки водных поверхностей от нефтяных загрязнений. Использование лазерного излучения позволяет эффективно воздействовать на нефтяные пленки, обеспечивая их термическое разрушение и испарение. Данная технология основана на принципе поглощения лазерной энергии нефтяными углеводородами, что приводит к резкому повышению температуры и, как следствие, к удалению загрязнений с поверхности воды. В отличие от традиционных методов, таких как механическое удаление или применение химических реагентов, газовые лазеры обеспечивают более высокую селективность и минимальное воздействие на окружающую среду. Они способны быстро обрабатывать большие площади, что значительно ускоряет процесс очистки. Кроме того, использование лазеров позволяет избежать образования

вторичных отходов, характерных для других методов. Однако применение газовых лазеров также имеет свои ограничения, включая высокую стоимость оборудования и зависимость от погодных условий. Тем не менее, дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к оптимизации технологии и расширению ее применения в экологии.

Ключевые слова: газовые лазеры, химические газовые лазеры, очистка, поверхности воды, пленки и нефтяная загрязнение.

Abstract: The purpose of this work is to become familiar with gas lasers, the history of their creation and further use in the fields. Gas lasers are a promising tool for cleaning water surfaces from oil contaminants. The use of laser radiation makes it possible to effectively influence oil films, ensuring their thermal destruction and evaporation. This technology is based on the principle of absorption of laser energy by petroleum hydrocarbons, which leads to a sharp increase in temperature and, as a consequence, to the removal of contaminants from the surface of the water. Unlike traditional methods such as mechanical removal or the use of chemicals, gas lasers provide higher selectivity and minimal environmental impact. They are able to quickly process large areas, which significantly speeds up the cleaning process. In addition, the use of lasers avoids the generation of secondary waste associated with other methods. However, the use of gas lasers also has its limitations, including the high cost of equipment and dependence on weather conditions. However, further research and development in this area may lead to optimization of the technology and expansion of its application in ecology.

Keywords: gas lasers, chemical gas lasers, cleaning, surface water, film and oil contamination.

Введение (Introduction)

Лазерное оборудование широко используется в различных сферах деятельности человека, в том числе в промышленности, медицине, науке и образовании. Особую нишу занимают газовые лазеры – устройства, особенностью которых является использование газообразного вещества в качестве активной среды. Впервые они были созданы человеком около 60-ти лет назад. С тех пор такие приборы квантовой электроники прошли сложный путь эволюции и совершенствования, что позволило повысить их коэффициент полезного действия и безопасность в применении.

Для повышения достоверности обнаружения нефтяных загрязнений необходимо независимо контролировать наличие одновременно двух эффектов – сглаживания (из-за нефтяного загрязнения) ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности. Это может быть достигнуто использованием дополнительной информации о приводном ветре (направлении или величине скорости приводного ветра) и специальной геометрической схемы для облучения морской поверхности.

Если говорить о разновидностях лазерных установок, в которых в качестве активной среды применяется вещество, находящееся в газообразном состоянии, то в первую очередь к ним следует отнести химические газовые лазеры. В них основным источником получения энергии являются особые химические реакции, которые возникают между составными компонентами такой среды. Подобные устройства обладают достаточно высокой мощностью, благодаря чему получили широкое распространение в сфере промышленности, где используются для резки металлов и перфорации особо прочных материалов.

1.1 Первый лазер в истории: каким он был

Удивительно, но именно Эйнштейн открыл стимул для лазеров примерно за 40 лет до Чарльза Таунса и Артура Шавлова. Эти ученые были первыми, кто опубликовали детальное и исчерпывающее предложение, которое и привело впоследствии к конструкциям лазеров разного типа. До 1917 года стимулированное поглощение и спонтанное излучение были единственными известными режимами

энергетических переходов внутри атома. Но в том году Эйнштейн предложил мощный термодинамический аргумент в пользу третьего вида излучения, стимулированного переходом. В отличие от спонтанного излучения, при котором электрон случайным образом распадается до более низкого энергетического уровня и испускает в процессе фотон, стимулированное излучение не является ни спонтанным, ни случайным. При стимулированном излучении электрон индуцируется к распаду фотоном, который имеет ту же энергию, что и энергия перехода электрона. Когда электрон сталкивается с таким

фотоном, он немедленно распадается и генерирует другой фотон с точно такой же энергией, что и фотон, который вызвал нисходящий переход. В результате два фотона не только имеют одинаковую энергию, частоту и длину волны, они направляются в одном направлении и имеют одинаковую поляризацию и фазу. Далее эту идею продолжали изучать и проводить расчёты.

Теодору Мейман в 1960м году провёл множество расчетов и пришел к выводу, что идеальным рабочим телом для генерации волн оптического диапазона станет кристалл рубина. Он же предложил принцип накачки рабочего тела – короткими вспышками света от соответствующей лампы-вспышки и способ создания положительной обратной связи для того, чтобы усилитель стал генератором – эту функцию выполняли зеркальные покрытия на торцах кристалла. Расчеты Меймана показали, что атомы хрома, которые являются примесью в кристаллах сапфира и делающие его рубином имеют подходящую систему энергетических уровней, которая делает возможной генерацию лазерного излучения.

В рубине реализуется простейшая трехуровневая схема. Атом хрома, поглощая свет в сине-зелёной области спектра, переходит на верхний возбужденный уровень, с которого происходит безизлучательный переход на метастабильный уровень, на котором он может задержаться на время порядка 1 мс. Из этого состояния атом возвращается на основной уровень, излучая фотон с длиной волны или 694 или 692 нм, так как метастабильный уровень на самом деле не один, их два очень близко расположенных. Возможность накопления атомов на метастабильном уровне и позволяет создать инверсную заселенность, а вместе с

ней и генерацию лазерного излучения, когда один или несколько спонтанно испущенных фотонов заставляют лавинообразно «осыпаться» все остальные атомы из метастабильного состояния в основное, испуская новые фотоны с одинаковой длиной волны, фазой, поляризацией и направлением движения. Они и создают яркий красный луч, которому свойственна когерентность.

Как был устроен рубиновый лазер Меймана в железе? Конструкция была чрезвычайно проста – в компактном корпусе находилась миниатюрная спиральная лампа-вспышка, внутри которой фиксировался ещё более миниатюрный кристалл рубина. Противоположные его торцы были посеребрены – один торец был «глухим» зеркалом, второй был посеребрен более тонким слоем, который пропускал некоторое количество света. Первый в мире лазер был длиной в 12 сантиметров, весил 300 грамм и выглядел игрушечным.

1.2 Принцип работы газового лазера

В качестве активной среды в таких лазерных установках выступает технический газ (вещество, которое находится в газообразном состоянии при естественных для него условиях) или же испарения химических элементов, к примеру, металлов. Кроме того, в некоторых случаях могут применяться и специальные смеси газообразных веществ. Особенностью газа, являющегося активной средой в таких лазерах, является то, что он обладает достаточно высокой оптической однородностью. Благодаря этому само качество излучения у лазерных приборов газового типа считается более высоким по сравнению с аналогичными типами таких устройств.

Для наполнения энергией активного тела в газе применяются электрические разряды, которые вырабатываются электродами в полости трубки прибора. В процессе соударения электронов с газовыми частицами происходит их возбуждение. Таким образом создается основа для излучения фотонов. Вынужденное испускание световых волн в трубке повышается в процессе их прохождении по газовой плазме. Выставленные зеркала на торцах цилиндра создают основу для преимущественного направления светового потока. Полупрозрачное зеркало, которым снабжается газовый лазер, отбирает из направленного луча долю фотонов, а остальная их часть отражается внутрь трубки, поддерживая функцию излучения.

1.3 Рост мощности промышленных лазеров и их применение

Лазеры этого диапазона мощности применяются в основном в металлообработке — для резки, сварки, наплавки, спекания порошков, термообработки. Существуют также и другие интересные приложения, такие как очистка поверхностей, удаление краски, резка камня, керамики и бетона. Длина волны таких лазеров равна 1.07 мкм, хотя возможно использование и других длин волн — 1.5 мкм или 1.9 мкм.

Предлагаемые заказчикам лазеры мощностью до 1 кВт имеют одномодовый выход с пространственными характеристиками излучения,

близкими к идеальным гауссовым. Это обеспечивает отличные условия для использования длиннофокусной оптики, формирующей узкие перетяжки большой длины.

Более мощные лазеры — от 1 кВт до 10 кВт — относятся к классу маломодовых. Выходное транспортное волокно таких лазеров имеет диаметр от 50 мкм до 150 мкм при качестве выходных пучков ВРР от 2 до 7 мм*мрад. Модуляция излучения осуществляется за счет модуляции тока накачки с частотой до нескольких кГц.

Эти лазеры характеризуются очень высоким КПД (25–30%), в 2–3 раза превосходящим лучшие промышленные СО₂ лазеры. Для охлаждения лазеров используются чиллеры с внутренним водяным или антифризовым контуром и теплосбросом в воздух или внешний водяной контур.

Поставка волоконных лазеров этого диапазона мощности осуществляется в России с 2002 года. На данный момент это наиболее интересное и динамично развивающееся направление развития волоконных лазеров для промышленных применений.

1.4 Способ осуществляют следующим образом.

Лазер доставляют к обрабатываемой зоне на борту корабля или летательного аппарата. Посредством системы формирования облучают поверхность непрерывным или импульсно-периодическим излучением. Способ осуществляют в следующей последовательности. В случае, когда слой нефти или нефтепродуктов полностью поглощает энергию излучения, если обработку производят непрерывным излучением, то величина плотности мощности излучения $\approx 10^2$ – 10^3 Вт/см² оказывается достаточной для того, чтобы скорость теплоподвода превысила естественный теплоотвод.

При этом скорость сканирования излучения (или время экспозиции излучения на данном участке поверхности) в каждом конкретном случае устанавливают расчетным путем такой, чтобы в течение времени воздействия происходило полное испарение нефтепродуктов. Пары нефтепродуктов, поднимаясь над поверхностью, смешиваются с кислородом воздуха, образуя

горячую смесь, которая поджигается падающим излучением. Таким образом, процесс горения локализуется над водной поверхностью.

Для увеличения производительности процесса обработки поверхности можно применять импульсно-периодическое излучение с плотностью мощности излучения в импульсе $\approx 10^6 \text{ Вт/см}^2$ при плотности энергии 1-3 Дж/см².

При таких высоких параметрах излучения за счет концентрированного и очень быстрого подвода энергии вначале осуществляется механизм сильного удара (как от механического воздействия), в результате которого образуются капли, при этом слой нефтепродуктов диспергирует до состояния капельной аэрозоли. Далее под воздействием излучения происходит процесс испарения части вещества образовавшихся капель, а образовавшиеся пары нефтепродуктов смешиваются с кислородом воздуха, образуют горячую смесь и поджигаются падающим излучением. Тепла, выделяющегося в процессе горения, достаточно для поддержания процесса до полного сгорания капли.

При реализации способа очистки слой нефти становится все тоньше и, когда он приобретает вид пленки, прозрачной для падающего излучения, поскольку излучение выбрано с длиной волны в диапазоне, соответствующем области светового поглощения воды, способ реализуют дальше в результате следующих процессов.

Если обработка идет непрерывным излучением, то величина плотности мощности $\approx 10^2\text{-}10^3 \text{ Вт/см}^2$ оказывается достаточной для того, чтобы скорость теплоподвода превысила естественной теплоотвод. При этом скорость сканирования излучения (или время экспозиции излучения на данном участке поверхности) выбирают такой, чтобы в течение времени воздействия произошло испарение тонкого слоя воды, подстилающей слой нефтепродуктов. При этом в начале воздействия излучения пары воды, расширяясь, разрывают пленку нефтепродуктов, образуя капельную аэрозоль.

Далее процесс аналогичен, но в процессе горения участвуют пары воды. При импульсно-периодическом режиме облучения поверхности вначале осуществляются динамические процессы воздействия излучения на поверхность воды под пленкой нефтепродуктов (эффект сильного шлепка по воде). При этом

поверхность воды, покрытая нефтяной пленкой, диспергируется в капельную аэрозоль. Капли воды, разлетаясь над поверхностью, захватывают часть нефтепродуктов, обволакиваясь последними. Далее процесс происходит в падающем излучении аналогично описанному на каждой капле аэрозоля.

Глубина проникновения лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм для нефти различных сортов составляет 100 – 300 мкм, а для воды – порядка 10 мкм. Механизм метода лазерной очистки заключается в следующем. Лазерное излучение сильнее всего поглощается тонким слоем воды, который непосредственно примыкает к нефтяной пленке, поэтому вода в этом слое быстро нагревается и переходит в состояние метастабильности. Происходит парообразующий взрыв метастабильной перегретой воды, вследствие чего разрывается тепловой контакт нефти и воды, который препятствует горению нефтяной пленки в обычных условиях. Нефтяная пленка подбрасывается вверх на высоту 30–40 см и дробится на фрагменты. Капли нефти смешиваются с атмосферным воздухом и образуют горючую смесь. Происходит самовоспламенение смеси и капли нефтяного загрязнения сгорают в воздухе.

Пример. Проведены модельные опыты по сжиганию пленки нефтепродуктов с поверхности воды непрерывным и импульсно-периодическим излучением. В первом случае излучение СО₂лазера непрерывного действия направлено на пленку солянки толщиной ≈ 1 мм. При экспозиции излучения плотностью мощности ≈ 1 кВт/см² в течение $\approx 0,5-0,7$ с пленка полностью сгорает над поверхностью воды с образованием пятна на водной поверхности, свободной от солянки.

Во втором случае облучение ведут в двух режимах: в зависимости от толщины пленки поверхность облучают лазером импульсов различной частоты (от единичного импульса до 200 Гц) с плотностью мощности $\approx 10^6$ Вт/см² и плотностью энергии 1-3 Дж/см². При этом пленка сгорает над поверхностью воды.

Если нефтепродукты имеют высокую вязкость, например когда в них много глицерина, целесообразно очистку водной поверхности осуществлять непрерывным излучением, поскольку в этом случае под воздействием импульсного излучения образуются тяжелые капли, которые падают, не успевая загореться.

В случае применения импульсно-периодического излучения при обработке больших поверхностей промежутки между импульсами используют для перемещения луча на соседние необработанные участки.

Предлагаемый способ очистки водной поверхности обеспечивает полное уничтожение нефтепродуктов без загрязнения водного бассейна и без негативного воздействия на водную флору и фауну, а также позволяет оптимизировать затраты лазерной энергии на обработку. Особенно эффективен данный способ при очистке поверхности воды от нефтяной пленки, имеющей малую толщину (мономолекулярный слой цвета побежалости).

Дискуссия

Одним из наиболее эффективных и экологически чистых методов ликвидации разлива нефти и нефтепродуктов является механический метод, позволяющий в первые часы после разлива собрать наибольшую долю разлитого нефтепродукта.

Недостаток, связанный с движением пятна разлива, огражденного бонами, под действием ветра всегда можно контролировать и следовать за ним на плав средстве, на котором находится оборудование для сбора нефтепродуктов.

Главный недостаток метода резкое снижение его эффективности при малой толщине пленки (менее одного миллиметра).

Эту задачу можно решить применением комбинированного механико-лазерного метода.

Выводы

Таким образом, собрана обзорная информация по газовым лазерам, изучена история создания различных лазеров, рассмотрен принцип его работы, проанализированы методы ликвидации разлива нефти и нефтепродуктов. Также изучена информация по применению лазеров при очистке водных поверхностей от нефтяных загрязнений.

В случае применения импульсно-периодического излучения при обработке больших поверхностей промежутки между импульсами используют для перемещения луча на соседние необработанные участки.

Предлагаемый способ очистки водной поверхности обеспечивает полное уничтожение нефтепродуктов без загрязнения водного бассейна и без негативного воздействия на водную флору и фауну, а также позволяет оптимизировать затраты лазерной энергии на обработку.

Особенно эффективен данный способ при очистке поверхности воды от нефтяной пленки, имеющей малую толщину (мономолекулярный слой цвета побежалости).

Возможно, в дальнейшем применение газовых лазеров станет ведущей технологией при очистке водных поверхностей от нефтяных загрязнений. Так как это наиболее эффективный и экологически чистый метод.

Список использованной литературы

1. Антипенко, В. С. Лазеры и их применение. Часть 1 : учебное пособие для студентов специальностей ИТТСУ, ИПСС / В. С. Антипенко, В. А. Никитенко ; под ред. В. П. Вороненко. - Москва : РУТ (МИИТ), 2020. - 112 с. - Текст : электронный. - URL: <https://e.lanbook.com/book/123456> (дата обращения: 29.07.2025).
2. Аскарьян, Г. А. Действие мощного лазерного луча на поверхность воды с пленкой жидкости: селективное испарение, выжигание и выбрызгивание слоя, покрывающего поверхность воды / Г. А. Аскарьян, Е. К. Карлова, Р. П. Петров, В. Д. Студенов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1973. - Т. 18, № 11. - С. 661–664.
3. Журавлев, П. Д. Применение газодинамического лазера для очистки водных поверхностей от нефтяного загрязнения : дис.канд.техн. наук : 05.26.03 / П. Д. Журавлев ; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. - Москва, 2005. - 150 с.
4. Таканаева, О. А. Очистка поверхностей водоёмов от нефтяной пленки с помощью лазерного излучения / О. А. Таканаева // Актуальные проблемы

гуманитарных и естественных наук. - 2012. - № 12. - С. 25–30. - URL:
<https://cyberleninka.ru/article/n/ochistka-poverkhnostey-vodoyemov-ot-neftyany-plenki-s-pomoshchyu-lazernogo-izlucheniya> (дата обращения: 29.07.2025).