

УДК 42.55

НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ В АРКТИКЕ

В.В. АПОЛЛОНОВИнститут общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

В шельфовой зоне Северного ледовитого океана уже очень скоро будет использоваться высокоэффективное инновационное оборудование, оснащенное мощными лазерами. В скором времени предполагается активная разработка технологий на основе применения мощных лазеров, которые позволят снизить ледовые нагрузки на инженерные сооружения, работающие на континентальном шельфе, а также обеспечат увеличение скорости судов и танкеров, следующих по Северному морскому пути. При помощи мощных лазеров можно будет разрушать ледовый покров толщиной до нескольких метров вокруг инженерных сооружений, например, перед нефтедобывающими платформами и перед движущимися ледоколами.

Ключевые слова: мощные высокочастотные лазеры, резание льда, ледоколы.

ВВЕДЕНИЕ

Для работ в шельфовой зоне Северного ледовитого океана уже очень скоро будет использоваться высокоэффективное инновационное оборудование, оснащенное мощными лазерами. Правительством Российской Федерации предусмотрен широкий спектр работ, связанных с активным освоением нефтяных и газовых месторождений на шельфе в российском секторе Арктики. Предполагается активная разработка технологий на основе применения мощных лазеров, которые позволят снизить ледовые нагрузки на инженерные сооружения, работающие на континентальном шельфе, а также обеспечат увеличение скорости судов и танкеров, следующих по Северному морскому пути. Предполагается, что при помощи мощных лазеров можно будет разрушать ледовый покров толщиной до нескольких метров вокруг инженерных сооружений, например, перед нефтедобывающими платформами и перед идущими ледоколами. При этом наиболее эффективным представляется метод, в котором используется комбинация лазерного и механического воздействий на ледяной покров океана.

Впервые о возможности применения лазеров в интересах ледокольного флота было заявлено на конфе-

NEW APPLICATIONS OF HIGH POWER LASERS IN THE ARCTIC

V.V. APOLLONOV

Shelf zone of the Arctic will soon require the use of innovative, high-performance hardware equipped with high-power lasers. It is expected that high-power lasers can break the ice cover with the height up to several meters around such engineering structures as oil platforms and icebreakers. That requires the processing and cutting of different materials, in particular, ice. The high-repetition-rate, pulse-periodic regime of laser operation is much more efficient than the conventional CW regime.

KEYWORDS: *Laser, High power, high repetition rate laser, ice cutting, icebreaker.*

ренции Национального бюро стандартов (Колорадо, США) [5]. В настоящее время подобными разработками активно занимаются Канада, США, Норвегия, Швеция, Южная Корея и Россия. Ожидается, что на основании положительных результатов испытаний, а в этом мало кто сомневается, наша страна перейдет к полномасштабному созданию ледокольных средств, оснащенных мощными лазерными комплексами. Известно, что опыты по использованию лазеров в условиях Арктики проводятся не первый год и большинство опробованных технологий уже признано успешными.

Лазерная установка, размещенная на ледоколе, должна соответствовать требованиям «Российского морского регистра судоходства». В частности, обладать электромагнитной совместимостью с бортовым оборудованием, соответствовать требованиям пожарной безопасности и техники безопасности при работе с источниками излучения. Масса готовой лазерной установки должна быть не более 5 т, а время непрерывной работы до нескольких десятков тысяч часов. С ее помощью преодоление ледовых полей может стать гораздо более легкой задачей. Сегодня уже очевидно, что на нефте- и газодобывающих платформах, работа-

ющих в условиях Крайнего Севера, лазерные технологии будут весьма востребованы и смогут существенно облегчить работу персонала таких станций.

ВОДА И ЕЕ СОСТОЯНИЯ

Лед – одно из наиболее загадочных и в то же время привычных состояний воды. Вода имеет молекулярную массу, примерно равную 18,02, и может существовать в состояниях жидкости, пара и льда. Для воды характерны высокая температура кипения (+ 100° С) и плавления (0° С), высокие значения теплоты фазовых переходов (плавления, парообразования, сублимации). Вода обладает аномально высокой теплоемкостью. Это имеет большое значение в жизни природы – в ночное время, а также при переходе от лета к зиме вода остывает медленно, а днем или при переходе от зимы к лету так же медленно нагревается, являясь регулятором температуры на земном шаре.

Вода обнаруживает необычное свойство расширяться при замерзании, вследствие чего плотность льда ниже, чем воды при той же температуре, что нехарактерно для других веществ при переходе из жидкого состояния в твердое. Именно это свойство воды создает массу проблем для инженерно-технических сооружений, находящихся в водной среде. Среди других аномалий воды – высокое значение поверхностного натяжения и диэлектрической постоянной и значительная теплопроводность. Теплопроводность воды выше, чем других жидкостей, а льда – больше, чем других неметаллических твердых веществ. Теплопроводность льда при 0° С приблизительно в четыре раза больше, чем воды при той же температуре. Эти свойства важны при выработке технологий строительства в условиях, связанных с продолжительными низкими температурами.

Анализ диаграммы состояния воды имеет значение при разработке технологических режимов. Например, как следует из диаграммы, если лед нагревается при давлении меньше чем 0,610 кПа (4,58 мм рт. ст.), то он непосредственно переходит в пар. Это является основой способа сушки продуктов с помощью замораживания. Одной из особенностей воды является понижение температуры плавления льда с ростом давления, что важно при работах на значительных глубинах морских акваторий. В табл. 1–3 приведены основные теплофизические и механические свойства льда в широком диапазоне отрицательных температур, которые важны для проведения оценок эффективности применения лазеров для его разрушения, как плавлением, так и возгонкой (испарением).

В табл. 2 и 3 приводятся важные для проведения оценок физические данные, необходимые при анализе различных механизмов разрушения льда. При этом следует заметить, что при низких температурах Арктики и Антарктики возможно и чисто механическое разрушение льда с помощью как чисто лазерного

излучения, так и электрического разряда, подобное разрушению скальных пород при добыче полезных ископаемых или железобетонных конструкций при строительстве.

ЛАЗЕР КАК ИНСТРУМЕНТ

В настоящее время во многих технологических процессах, использующих лазеры с большой средней мощностью (более 100 Вт), нашли применение только источники, работающие в двух режимах – непрерывном и импульсно-периодическом (И-П) с низкой частотой повторения импульсов от единиц до сотен Гц при длительности импульсов в пределах десятков-сотен микросекунд и даже миллисекунд. При этом в большинстве случаев при взаимодействии реализуется чисто тепловой механизм, т. к. используется способность лазерного источника подвести достаточно большое количество энергии к малой площади поверхности обрабатываемого материала. Очень популярными в различных применениях стали волоконные лазеры, обладающие рядом важных преимуществ.

Однако при воздействии на лед, тепловой механизм, определяемый непрерывной модой излучения лазера и приводящий к образованию значительного количества жидкой фазы, представляется неэффективным. Высокочастотные И-П лазерные системы с большой средней мощностью, работающие в режиме модуляции добротности, который обеспечивает длительность импульсов от единиц до сотен наносекунд, позволяют реализовать принципиально другой механизм взаимодействия излучения с веществом – возгонку обрабатываемого вещества, обеспечивающую локальность выделения энергии не только в пространстве, но и во времени [1–3, 4]. Следует заметить, что в этом случае происходит взрывное локальное испарение вещества без промежуточной жидкой фазы. Такой механизм может существенно расширить область технологических применений лазерных источников.

До настоящего времени высокочастотный режим воздействия не нашел реального применения на практике в силу большой сложности его реализации при требуемом уровне средней мощности. Нами в начале

ТАБЛИЦА 1.

Теплофизические свойства льда

t° С	сл, кДж/ (кгК)	рл, кг/м³	λл, Вт/(мК)	ал 106, м²/с
0	2,12	916,4	2,23	1,2
-5	2,08	917,4	2,24	1,2
-10	2,04	918,2	2,25	1,2
-15	1,99	919,1	2,27	1,24
-20	1,96	919,96	2,29	1,3
-25	1,92	920,8	2,31	1,3
-30	1,88	920,8	2,32	1,34

ТАБЛИЦА 2.

Физические свойства льда

Свойство	Значение	Примечание
Теплоемкость, кал/(г° С) Теплота таяния, кал/г Теплота парообразования, кал/г	0,51 (0° С) 79,69 677	Теплоемкость значительно уменьшается с понижением температуры
Коэффициент термического расширения, 1/°С	$9,1 \cdot 10^{-5}$ (0° С)	
Теплопроводность, кал/(см·сек·° С)	$4,99 \cdot 10^{-3}$	
Удельная электрическая проводимость, ом ⁻¹ ·см ⁻¹	10^{-9} (0° С)	Энергия активации 11 ккал/моль
Поверхностная электропроводность, ом ⁻¹	10^{-10} (-11° С)	Энергия активации 32 ккал/моль
Модуль упругости Юнга, дин/см	10^{11} (-5° С)	Поликристаллический лед
Сопротивление, МН/м ² : раздавливанию разрыву срезу	2,5 1,11 0,57	Поликристаллический лед Поликристаллический лед Поликристаллический лед
Средняя эффективная вязкость, пз	10^{14}	Поликристаллический лед
Показатель степени степенного закона течения	3	
Энергия активации при деформировании и механической релаксации, ккал/моль	11,44–21,3	Линейно растет на 0,0361 ккал/(моль·° С) от 0 до 273,16 К

ТАБЛИЦА 3.

Значения предела прочности льда, Па

Характер деформации	Ориентировка усилия	Обозначение	Реки Севера и Сибири	Реки европейской части России
Сжатие	Перпендикулярно	R _{сж}	(45...65) 104	(25...40) 104
Местное смятие	Перпендикулярно	R _{см}	(110...150) 104	(55...80) 104
Растяжение	Параллельно	R _р	(70...90) 104	(30...40) 104
Срез	Параллельно	R _{ср}	(40...60) 104	(20...30) 104
Изгиб	Параллельно	R _{из}	(45...65) 104	(25...40) 104

2000 г. впервые был предложен и реализован высокочастотный И-П режим генерации лазера мощностью 10 кВт. При этом пиковая мощность генерируемого излучения на несколько порядков превышала среднюю мощность лазерного источника, т. е. мощность характерную для непрерывного режима. Возможность, вариации частоты повторения импульсов и, следовательно, значения пиковой мощности позволяет управлять процессом взаимодействия излучения с веществом в значительных пределах. Сравнение этих двух режимов излучения с точки зрения эффективности резки льда, т. е. возможных толщин и скоростей резки при заданной мощности источника, показывает что для И-П лазерного источника при резке льда той же толщины и длины необходимо наличие лазера в 30 раз меньшей мощности. И это без учета динамики взаимодействия излучения с продуктами воздействия в зоне реза.

Рассмотрим динамику процесса с точки зрения скорости выброса пара и минимизации процесса образования жидкой фазы в зоне реза в случае высоко-

частотного И-П режима воздействия. Чем меньше длительность импульса при фиксированной величине теплопроводности, тем меньше количество жидкости, мешающей проникновению лазерного излучения в зону реза. В то же время основная доля энергии лазерного импульса переводит лед в пар, который быстро уходит из зоны взаимодействия. Очевидно, что оба фактора процесса указывают на необходимость уменьшения длительности импульса лазерного излучения. Для высокочастотного И-П режима генерации излучения длительность импульса должна быть настолько короткой, насколько это возможно, исходя из требований на величину средней мощности лазерного источника и скважность генерируемой им последовательности импульсов [3].

Теперь это же сравнение двух режимов излучения проведем с точки зрения требования на точность сканирующей системы, применяемой для резки. Очевидно, что для сохранения стабильных условий резки льда (стабильного качества реза на криволинейных участках) необходимо обеспечить постоянство плотности

потока мощности. С энергетической точки зрения И-П режим работы лазера для резки льда намного лучше, чем непрерывный. Это означает, что стабильные условия подразумевают постоянство мощности лазера и скорости сканирования пучка. Это особенно важно для обработки ледяного пласта по сложной траектории. В этом случае невозможно поддерживать одинаковую скорость на линейных участках траектории и на крутых поворотах. Следует так же заметить, что в самом общем случае физические процессы при высокочастотной И-П резке твердых материалов во многом похожи. Рез образуется как совокупность отдельных отверстий при перемещении зоны воздействия по поверхности исходного объекта.

ПРОВЕРКА ПРАКТИКОЙ

В работе [1] представлены экспериментальные данные по резке льда непрерывными CO₂-лазерами мощностью 50 Вт и 4500 Вт. Полученный в цитируемой работе параметр качества резки льда в виде $S \text{ см}^2 / (\text{сек. кВт})$, где S площадь реза, отличался по величине для двух представленных уровней мощности. Эти параметры качества выглядели следующим образом: $8 \text{ см}^2 / (\text{сек. кВт})$ и $3 \text{ см}^2 / (\text{сек.кВт})$ соответственно. Взяв их за основу, будем считать первый параметр качества оптимистической оценкой и второй – пессимистической. В случае непрерывного излучения CO₂ лазера со средней мощностью 100 кВт получим для надреза льда глубиной 8 см скорость эффективного воздействия порядка 1 м/сек (оптимистическая оценка) и 38 см/сек – (пессимистическая оценка). В случае же высокочастотного И-П излучения CO₂ лазера со средней мощностью 100 кВт получаем следующее:

Оптимистическая оценка – 30 м/сек

Пессимистическая оценка – 11,4 м/сек.

Исходя из полученных данных, важно уделить большее внимание и распределению мощности лазерного излучателя по ледовому полю впереди ледокола и геометрии его носовой части. Так, лазерное излучение, ослабляющее прочность ледяного массива для последующего эффективного механического воздействия, может быть с помощью оптической системы разделено на 2, 3 или более пучков, воздействие которых должно сопровождаться соответствующими усилиями специально спроектированного носа корабля или конструкций, расположенных на его носовой части. Из представленных выше оценок вполне очевидно, что мощности 100 киловаттного бортового лазерного комплекса вполне достаточно для обслуживания большого количества каналов воздействия на ледяное поле и обеспечения широкого спектра задач при освоении богатств Северного ледовитого океана.

ВЫВОД

Именно высокочастотный И-П режим работы лазера для большинства процессов обработки и, в част-

ности, для резки льда, представляется намного более эффективным, чем традиционный непрерывный режим. Создание мощных лазерных комплексов и их применение для заявленных целей представляется важной хозяйственной задачей, требующей разумного внимания и поддержки государства.

ЛИТЕРАТУРА

1. АПОЛЛОНОВ V.V. Laser pulse phenomena and applications, INTECH, Croatia. 2010. P. 19–35.
2. АПОЛЛОНОВ V.V. High power PP lasers. NOVA science publ. inc., 2013.
3. АПОЛЛОНОВ V.V. High power optics. Springer Publishing House, 2014.
4. АПОЛЛОНОВ V.V., КИУКО V.V., КИСЛОВ V.I., СУЗДАЛ'ТСЕВ A.G. High repetition rate P-P regime for high power lasers // Quantum electronics (2003). V. 33, № 9. P. 753–760.
5. CLARK A.F., MOULDER J.C., REED R.P. Ice cutting by laser // Applied Opt. 1973. V. 12, № 6. P. 56–67.

Аполлонов Виктор Викторович,
д.ф.-м.н., профессор Института общей физики
им. А.М. Прохорова РАН,

☎ 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38,
e-mail: vapollo@rambler.ru, тел.: +7 (985) 920-73-66