

УДК 536.2

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-277-282

## РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ЩЕЛЕВОГО ЛАЗЕРА

А.Ю. Горбунова, В.А. Кораблев, Ю.П. Заричняк

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Автор для переписки: algor1331@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 17.01.20, принята к печати 06.03.20  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Горбунова А.Ю., Кораблев В.А., Заричняк Ю.П. Расчет теплофизических свойств многокомпонентной газовой среды щелевого лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 277–282. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-277-282

### Аннотация

**Предмет исследования.** Предложена методика определения теплопроводности и вязкости газовой среды щелевого лазера, основанная на использовании известных свойств ее составляющих. Определение теплопроводности необходимо для составления математической и тепловой моделей при разработке теплового режима. Особенностью предложенной методики является возможность получения эффективных значений характеристик с достаточной точностью для газов сложного состава, содержащих более двух компонентов. **Метод.** Методика расчета заключается в последовательном применении формул Линдсея–Бромли и Вилке для бинарного газа к компонентам смеси в зависимости от их мольной концентрации. Порядок выбора компонентов обусловлен наименьшим отклонением расчетных значений от справочных данных. **Основные результаты.** Верификация метода произведена сравнением расчетных и экспериментальных данных для смесей из трех составляющих. Установлено, что неопределенность значений вязкости не превышает 1,5 % при среднем значении отклонения менее 1 %. Среднее отклонение значений теплопроводности выше, но при этом неопределенность не превышает 5 %. Для наиболее часто применяемого состава смеси газов среды щелевого лазера, состоящей из CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Хе и Не, вычислены теплофизические свойства для случаев минимальной и максимальной концентрации возникающего в процессе эксплуатации монооксида углерода. Показаны поэтапное применение метода и зависимость теплопроводности от температуры. В диапазоне рабочих температур наблюдается существенный рост теплопроводности (более чем в два раза). Так, в диапазоне комнатных температур (300 К) теплопроводность составляет 0,067 Вт/(м·К), при 800 К достигает значений 0,14 Вт/(м·К). Подобное различие создает существенную неравномерность температурного поля газовой среды и существенно влияет на стабильность работы лазера. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут найти применение при разработке щелевых лазеров, а также устранить перепады мощности и стабилизировать работу уже эксплуатируемых лазеров путем регулирования концентраций компонентов газовой среды.

### Ключевые слова

теплопроводность, вязкость, многокомпонентная газовая смесь, щелевой лазер, метод определения теплопроводности

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-277-282

## CALCULATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SLAB LASER MULTI-COMPONENT GAS MEDIUM

A. Yu. Gorbunova, V. A. Korablev, Yu. P. Zarichnyak

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: algor1331@mail.ru

### Article info

Received 17.01.20, accepted 06.03.20  
 Article in Russian

**For citation:** Gorbunova A. Yu., Korablev V. A., Zarichnyak Yu. P. Calculation of thermophysical properties of slab laser multi-component gas medium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 277–282 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-277-282

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper presents a method for calculation of thermal conductivity and viscosity of the gaseous slab laser medium. The method is based on the use of the known properties of its components. Thermal conductivity determination is necessary for mathematical and thermal modeling in the process of thermal mode development. The main feature of the proposed technique is application versatility and the possibility to obtain effective characteristics with sufficient accuracy for complex composition gases containing more than two components. **Method.** The calculation approach lies in consistent application of the Lindsay-Bromley and Wilke formulas for binary gas to the components of the mixture depending on their molar concentration. The component selection order is due to the smallest variance of the calculated values from the reference data. **Main Results.** The method was verified by comparison of the calculated and experimental data for three-component mixtures. It was found that viscosity measurement error does not exceed 1.5 % with an average deviation of less than 1 %. The average deviation of the values in the case of thermal conductivity is much higher, but the measurement error does not exceed 5 %. For the most frequently used composition of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Xe, and He mixture as a slab laser medium, the thermal properties were calculated for the minimum and maximum concentrations of carbon monoxide arising during operation. The tables show step-by-step application of the method and the dependence of thermal conductivity on temperature. There is a strong increase in thermal conductivity in the range of operating temperatures (more than twice). For example, at room-temperature range (300 K) it is equal to 0.067 W/(m·K), at 800 K it reaches 0.137 W/(m·K). This difference creates a significant non-uniformity of gas medium temperature field and affects drastically the laser stability. **Practical Relevance.** The results obtained can find practical application in the development of slab lasers and can be used to eliminate power drops and stabilize the operation of existing lasers providing the regulating process for the component concentrations of the gas composition.

**Keywords**

thermal conductivity, viscosity, multicomponent gas mixture, slab laser, thermal conductivity measurement technique

**Введение**

В настоящее время газовые лазеры широко применяются при обработке материалов, а именно: при резке, сварке и маркировке. Щелевые газовые лазеры на смесях CO<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> + Xe + He, благодаря компактности генератора излучения и высокой скорости резки по сравнению с традиционными проточными CO<sub>2</sub>-лазерами, находят все более широкое применение [1, 2].

Стабильность работы подобного лазера зависит от комплекса свойств, важной составляющей которых являются теплофизические свойства газовой среды, существенно влияющие на тепловой режим. Температурный профиль составляющих генератора излучения изменяется в широком диапазоне, так как его мощность достигает нескольких киловатт. Обычно в целях обеспечения стабильной работы лазера газовая среда состоит не менее чем из четырех различных компонентов [3], что осложняет вычисление общего коэффициента теплопроводности, требующегося для расчета оптимального теплового режима работы лазера.

Теплопроводность газовой смеси редко является линейной функцией от теплопроводности ее составляющих из-за различий в молекулярном весе и размере молекул [4]. В зависимости от полярности компонентов она может превышать либо быть меньше значения, полученного по правилу аддитивности, соответственно [5]. Строгого теоретического решения для теплопроводности многокомпонентного газа не существует, поэтому на практике используют полуэмпирические и эмпирические методы. Наиболее простым способом расчета теплопроводности смеси газов является последовательное вычисление параметров по формулам для бинарных газовых смесей.

Большое количество методик по расчету теплопроводностей бинарных смесей являются результатами работ по усовершенствованию уравнения, полученного А. Васильевой [6]. Ее уравнение хорошо применимо для газовых смесей с низкой плотностью [7], которые преимущественно используются в лазерах со щелевой

конструкцией. Отметим несколько наиболее важных модификаций этого уравнения: модификация Мэсона–Саксена [8], ее создатели использовали предложение Гиршфельдера об определении коэффициента Эйкена, и модификация Линдсея–Бромли [9], с использованием газовой модели Сатэрленда. Последняя методика является наиболее изученной в этой области и дает средние погрешности менее 2 % [5].

Кроме данных методов, существует эмпирический метод Брокау [10], особенно полезный для подсчета теплопроводностей неполярных смесей, и уравнение Шашкова и Абраменко [11], которое применяется для расчета полярных смесей, средние погрешности при вычислении данными способами лежат в диапазоне 2–3 % [5]. Главным недостатком перечисленных выше методик является невозможность их применения для газов, состоящих более чем из двух компонентов. Настоящая работа направлена на составление методики, которая с приемлемой точностью определит теплофизические свойства газа, имеющего сложный состав.

**Метод расчета теплопроводности**

Метод последовательного вычисления через формулы для бинарного газа полагается на известные свойства веществ. В качестве основного уравнения для расчета теплопроводности двухкомпонентной смеси принято уравнение Линдсея–Бромли, так как оно является универсальным, наиболее проверенным и дающим наименьшие средние погрешности среди перечисленных [5, 9]:

$$\lambda_{ij} = \frac{\lambda_i}{1 + \left(\frac{x_j}{x_i}\right) A_1} + \frac{\lambda_j}{1 + \left(\frac{x_i}{x_j}\right) A_2},$$

где

$$A_1 = \frac{1}{4} \left( 1 + \left[ \frac{\mu_i}{\mu_j} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{0.75} \frac{1 + s_i/T}{1 + s_j/T} \right]^{0.5} \right)^2 \left( \frac{1 + s_j/T}{1 + s_i/T} \right);$$

$$A_1 = \frac{1}{4} \left( 1 + \left[ \frac{\mu_i}{\mu_j} \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{0,75} \frac{1 + s_j/T}{1 + s_i/T} \right]^{0,5} \right)^2 \left( \frac{1 + s_{ij}/T}{1 + s_j/T} \right),$$

где  $\mu_i, \mu_j$  — вязкости компонентов  $i$  и  $j$ ;  $\lambda_i$  и  $\lambda_j$  — коэффициенты теплопроводности компонентов;  $x_i$  и  $x_j$  — молярные доли компонентов;  $M_i$  и  $M_j$  — молярные массы компонентов;  $T$  — абсолютная температура;  $s_i$  и  $s_j$  — константы Сатэрленда для компонентов  $i$  и  $j$  соответственно.

Приведенная константа Сатэрленда  $s_{ij}$ , учитывающая влияние сил межмолекулярного взаимодействия на длину свободного пробега молекул, для неполярных компонентов  $s_{ijH}$  определяется по формуле

$$s_{ijH} = \sqrt{s_i s_j},$$

а для полярных компонентов  $s_{ijП}$  — по формуле

$$s_{ijП} = 0,733 \sqrt{s_i s_j}.$$

Вязкость бинарной смеси газов рассчитывается аналогично последовательностью действий по общеизвестной формуле Вилке для газа из двух составляющих

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_i}{1 + \left( \frac{x_j}{x_i} \right) \Phi_{12}} + \frac{\mu_j}{1 + \left( \frac{x_i}{x_j} \right) \Phi_{21}},$$

где

$$\Phi_{ij} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0,5} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{0,25} \right]^2}{(2\sqrt{2}) \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{0,5}}.$$

Молекулярная масса  $M$  при этом считается как среднее взвешенное значение в соответствии с молярными долями  $x_i, x_j$ :

$$M_{ij} = \frac{x_i M_i + x_j M_j}{x_i + x_j}.$$

Суть метода заключается в следующем: первоначально выбирается пара компонентов смеси с максимальной мольной концентрацией, и для них по приведенным формулам рассчитываются характеристики  $\mu_{ij}, \Phi_{ij}, s_{ij}, \lambda_{ij}, M_{ij}$ . Далее полученная смесь компонентов  $i-j$  рассматривается как квазиоднородный компонент с вязкостью  $\mu_{ij}$ , постоянной Сатэрленда  $s_{ij}$  и теплопроводностью  $\lambda_{ij}$ .

### Верификация метода

Проверка метода была проведена посредством трех-компонентных газов. Рассматривались как полярные, так и неполярные компоненты. Некоторые результаты проверки приведены в табл. 1 и 2, сравнение произошло с экспериментальными данными из статьи [12] и справочника [13].

Данный метод был реализован Н. Цирельманом и А. Комаровым в Уфимском государственном авиационном техническом университете и дал результаты с относительным расхождением с экспериментом не более 4,64 % [14].

Сравнение с экспериментальными значениями в настоящей работе выявило максимальное расхождение, составляющее 5 %.

### Применение метода для газовой среды щелевого лазера

Теплопроводность смеси является функцией от температуры и давления, поэтому на ее значение будут влиять условия, при которых используется газ. Температура газа, расположенного между электродами, меняется по сечению и толщине зазора [15], однако, в случае щелевого лазера, давление практически не вносит вклад в теплопроводность из-за малых значений, 40–70 торр (газ Максвелла), по оценкам теплопроводность возрастает на 1 % при увеличении на 1 атм [5]. Таким образом, тепловой режим существенно зависит от свойств среды, которые являются функциями температуры. В связи с зависимостью  $\lambda(T)$  температурное поле в газе имеет сложный вид.

Таблица 1. Сравнение результата расчета вязкости трехкомпонентных газовых смесей с экспериментальными данными

Соединение	Температура, К	Объемные доли компонентов, %	$\mu_{\text{экс}} \cdot 10^7$ , Па·с	$\mu_{\text{расч}}$ , Па·с	Относительное расхождение, %
Ne–Ar–Kr	298	Ne — 28, Ar — 50, Kr — 22	258	256,1	0,7
		Ne — 17, Ar — 29, Kr — 54	259	258,8	менее 0,1
		Ne — 44, Ar — 19, Kr — 37	278,6	274,3	1,5
He–Ne–Kr	373	He — 54, Ne — 33, Kr — 13	334,2	337,2	0,9
He–Ne–Kr	483	He — 54, Ne — 33, Kr — 13	399,2	402,0	0,6
He–Ar–Kr	373	He — 50, Ar — 31, Kr — 19	300,5	298,2	0,8
He–Ar–Kr	483	He — 50, Ar — 31, Kr — 19	363,3	366,0	0,7
Воздух (только N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar)	300	N <sub>2</sub> — 78, O <sub>2</sub> — 21, Ar — 1	184,6	184,5	менее 0,1
Воздух (только N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar)	400	N <sub>2</sub> — 78, O <sub>2</sub> — 21, Ar — 1	230,1	229,0	0,5
Воздух (только N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar)	500	N <sub>2</sub> — 78, O <sub>2</sub> — 21, Ar — 1	267,1	268,3	0,5

Таблица 2. Сравнение результата расчета теплопроводности трехкомпонентных газовых смесей с экспериментальными данными

Соединение	Температура, К	Объемные доли компонентов, %	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^7$ , Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{расч}}$ , Вт/(м·К)	Относительное расхождение, %
Ne–Ar–Kr	301	Ne — 49, Ar — 26, Kr — 25	0,0247	0,0251	1,6
Воздух (только N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar)	300	N <sub>2</sub> — 78, O <sub>2</sub> — 21, Ar — 1	0,0262	0,0261	менее 0,1
Воздух (только N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar)	400	N <sub>2</sub> — 78, O <sub>2</sub> — 21, Ar — 1	0,0338	0,0322	5
Воздух (только N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar)	500	N <sub>2</sub> — 78, O <sub>2</sub> — 21, Ar — 1	0,0407	0,0393	3,6

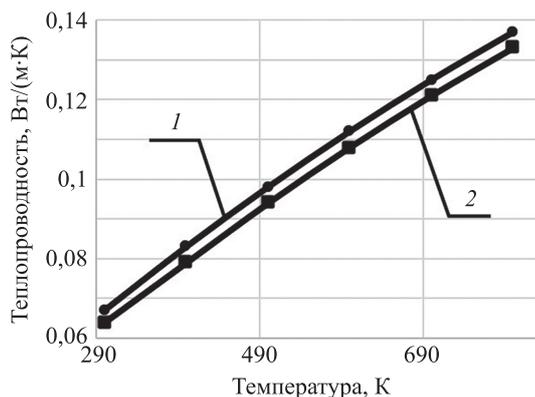


Рисунок. Зависимость теплопроводности от температуры при максимальной (1) и минимальной (2) объемной доли монооксида углерода

Оптимальным для щелевых CO<sub>2</sub>-лазеров является соотношение мольных долей CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:Xe:He = 1:1:0,5:4 [3]. Химические реакции, протекающие внутри рабочего газа, изменяют исходное соотношение. Известно, что в плазме газового разряда происходит диссоциация молекул диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), в результате чего при эксплуатации появляются монооксид углерода (CO), а также молекулярный и атомарный кислород [16]. CO<sub>2</sub> впоследствии может быть восстановлен, что приводит к постепенному перетеканию CO и CO<sub>2</sub> друг в друга. Концентрация азота при этом практически не изменяется, относительно концентраций остальных компонентов данных нет.

В табл. 3 и 4 представлен поэтапный расчет теплофизических свойств газовой среды для щелевого лазера в двух случаях: при максимальном и минимальном значениях объемной доли CO.

Таблица 3. Поэтапный расчет вязкости газовой смеси щелевого лазера

Вязкость	Температура, К	Смесь He–CO <sub>2</sub>	Смесь (He–CO <sub>2</sub> )–N <sub>2</sub>  (He–CO)–N <sub>2</sub>	Смесь (He–CO <sub>2</sub> –N <sub>2</sub> )–Xe (He–CO–N <sub>2</sub> )–Xe
$\mu_{\text{см}} \cdot 10^7$ при min $x_{\text{CO}}$ , Па·с	300	182	183	205
	400	224	225	257
	500	269	257	309
	600	311	309	356
$\mu_{\text{см}} \cdot 10^7$ при max $x_{\text{CO}}$ , Па·с	300	191	192	216
	400	234	235	271
	500	276	277	322
	600	314	314	367

Таблица 4. Поэтапный расчет теплопроводности газовой смеси щелевого лазера

Теплопроводность	Температура, К	Смесь He–CO <sub>2</sub>	Смесь (He–CO <sub>2</sub> )–N <sub>2</sub>  (He–CO)–N <sub>2</sub>	Смесь (He–CO <sub>2</sub> –N <sub>2</sub> )–Xe (He–CO–N <sub>2</sub> )–Xe
$\lambda_{\text{см}} \cdot 10^3$ при min $x_{\text{CO}}$ , Вт/(м·К)	300	89	75	64
	400	109	92	79
	500	130	110	94
	600	149	126	108
$\lambda_{\text{см}} \cdot 10^3$ при max $x_{\text{CO}}$ , Вт/(м·К)	300	98	80	67
	400	120	98	83
	500	143	117	98
	600	164	134	112

На рисунке представлен результат расчетов в виде двух температурных зависимостей теплопроводности газовой среды.

Наблюдается сильный рост теплопроводности газа в области температур эксплуатации. При повышении температуры до 700 К теплопроводность возрастает в два раза по сравнению с нормальными условиями. Было выявлено, что концентрация CO<sub>2</sub> и CO слабо влияет на теплофизические свойства, что является определяющим фактором развития последующих химических взаимодействий.

### Заключение

В работе выбран и проверен с помощью экспериментальных данных метод расчета теплофизических свойств многокомпонентной газовой смеси, заключающийся в последовательном вычислении свойств через бинарные формулы Линсея–Бромли и Вилке. Максимальное отклонение расчетных данных

составило 5 % для теплопроводности и 2 % для вязкости.

Проведен расчет наиболее распространенного газового состава щелевого лазера для двух крайних случаев: минимальной и максимальной доле монооксида углерода. Полученные данные позволили определить тепловой режим работы щелевого лазера для разработки системы термостабилизации и уменьшения выпуска бракованной продукции.

Остается требующем уточнения вопрос об изменении газового состава в щелевом CO<sub>2</sub>-лазере, так как химические реакции внутри зазора происходят в течение всего процесса его работы как между самими газами, так и между газами и электродами. Диоксид углерода является важнейшим параметром, концентрация которого зависит от остальных компонентов газовой среды и влияет на эффективную теплопроводность смеси, что существенно сказывается на работоспособности лазера. Это вызывает потребность в создании механизмов регулирования концентраций компонентов этого состава.

### Литература

1. Бреттшнайдер К. Лазерная обработка металлов – ключ к успеху для контрактных производителей // Фотоника. 2009. № 2. С. 6–9.
2. Казакевич В.С., Яреско С.И. Тенденции развития рынка лазерных технологий для решения задач лазерной обработки материалов. Часть 1. Мировой лазерный рынок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 266–275.
3. Горбунов А.К., Жданов С.М., Пчелинцева Н.И. О возможности использования наночастиц меди для повышения долговечности отпаянного CO<sub>2</sub>-лазера // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 2. С. 52.
4. Toptan A. A Novel Approach to Improve Transient Fuel Performance Modeling in Multi-Physics Calculations. North Carolina State University, 2019. 157 p.
5. Рид Р.К., Праусниц Дж.М., Шервуд Т.К. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
6. Wassiljewa A. Heat conduction in gas mixtures // Physikalische Zeitschrift. 1904. V. 5. N 22. P. 737–742.
7. Lilliestråle A., Mølnvik M.J., Tangen G., Jakobsen J.P., Munkejord S.T., Morin A., Størset S.O. The IMPACTS Project: The Impact of the Quality of CO<sub>2</sub> on Transport and Storage Behaviour // Energy Procedia. 2014. V. 51. P. 402–410. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.047
8. Mason E.A., Saxena S.C. Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures // Physics of Fluids. 1958. V. 1. N 5. P. 361–369. doi: 10.1063/1.1724352
9. Lindsay A.L., Bromley L.A. Thermal conductivity of gas mixtures // Industrial and Engineering Chemistry. 1950. V. 42. N 8. P. 1508–1511. doi: 10.1021/ie50488a017
10. Brokaw R.S. Estimating thermal conductivities for nonpolar gas mixtures // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. V. 47. N 11. P. 2398–2400. doi: 10.1021/ie50551a056
11. Пашков А.Г., Абраменко Т.Н. Теплопроводность газовых смесей. М.: Энергия, 1970. 288 с.
12. Singh K., Sood N.K. Viscosity and thermal conductivity of gas mixtures // Indian Journal of Pure & Applied Physics. 2003. V. 41. N 2. P. 121–127.
13. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М: Наука, 1972. 720 с.
14. Цирельман Н.М., Комаров А.В. Определение теплофизических свойств многокомпонентной газовой смеси // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21. № 1. С. 128–135.
15. Перфильев В.О., Скрыль Ю.В., Шушуев Д.А. Экспериментальная установка CO<sub>2</sub>-лазера с щелевой геометрией // Известия АлтГУ. 2005. № 1. С. 134–135.
16. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. Диссоциация двуоксида углерода в отпаянных волноводных CO<sub>2</sub>-

### References

1. Brettshneider K. Laser metal working as a key to contract producers success. *Photonics Russia*, 2009, no. 2, pp. 6–9. (in Russian)
2. Kazakevich V., Yaresko S. Tendencies of development of the market of laser technologies for the solution of problems of laser processing of materials. Part 1. The world laser market. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 266–275. (in Russian)
3. Gorbunov A.K., Jdanov S.M., Pchelinceva N.I. About possible usage of copper nanoparticles for increasing of durability of sealed CO<sub>2</sub>-laser. *Science and Education*, 2012, no. 2, pp. 52. (in Russian)
4. Toptan A. A Novel Approach to Improve Transient Fuel Performance Modeling in Multi-Physics Calculations. North Carolina State University, 2019, 157 p.
5. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. *The Properties of Gases and Liquids*. New York, 1977.
6. Wassiljewa A. Heat conduction in gas mixtures. *Physikalische Zeitschrift*, 1904, vol. 5, no. 22, pp. 737–742.
7. Lilliestråle A., Mølnvik M.J., Tangen G., Jakobsen J.P., Munkejord S.T., Morin A., Størset S.O. The IMPACTS Project: The Impact of the Quality of CO<sub>2</sub> on Transport and Storage Behaviour. *Energy Procedia*, 2014, vol. 51, pp. 402–410. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.047
8. Mason E.A., Saxena S.C. Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures. *Physics of Fluids*, 1958, vol. 1, no. 5, pp. 361–369. doi: 10.1063/1.1724352
9. Lindsay A.L., Bromley L.A. Thermal conductivity of gas mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1950, vol. 42, no. 8, pp. 1508–1511. doi: 10.1021/ie50488a017
10. Brokaw R.S. Estimating thermal conductivities for nonpolar gas mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1955, vol. 47, no. 11, pp. 2398–2400. doi: 10.1021/ie50551a056
11. Shashkov A.G., Abramenko T.N. *Thermal Conductivity of Gas Mixtures*. Moscow, Energy Publ., 1970, 288 p. (in Russian)
12. Singh K., Sood N.K. Viscosity and thermal conductivity of gas mixtures. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 2003, vol. 41, no. 2, pp. 121–127.
13. Vargaftik N.B. *Handbook on Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow, Nauka Publ., 1972, 720 p. (in Russian)
14. Tsirelman N.M., Komarov A.V. Determination thermophysical properties of multicomponent gas mixtures. *Vestnik USATU*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 128–135. (in Russian)
15. Perfilov V.O., Skril Y.V., Shushuev D.A. Experimental installation of the CO<sub>2</sub>-laser with slot-hole geometry. *Izvestiya of Altai State University*, 2005, no. 1, pp. 134–135. (in Russian)
16. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Dissociation of carbon dioxide in sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide lasers

лазерах с высокочастотным возбуждением // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 1. С. 15–19.

with radio-frequency excitation. *Quantum Electronics*, 2000, vol. 30, no. 1, pp. 15–19. doi: 10.1070/QE2000v030n01ABEH001649

#### Авторы

**Горбунова Елена Юрьевна** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0246-1324, [algor1331@mail.ru](mailto:algor1331@mail.ru)

**Кораблев Владимир Антонович** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тьютор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7007176296, ORCID ID: 0000-0002-6691-7140, [kvant1953@gmail.com](mailto:kvant1953@gmail.com)

**Заричняк Юрий Петрович** — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 670151341, ORCID ID: 0000-0001-8713-3583, [zarich4@gmail.com](mailto:zarich4@gmail.com)

#### Authors

**Alena Yu. Gorbunova** — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0246-1324, [algor1331@mail.ru](mailto:algor1331@mail.ru)

**Vladimir A. Korablev** — PhD, Senior Researcher, Tutor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7007176296, ORCID ID: 0000-0002-6691-7140, [kvant1953@gmail.com](mailto:kvant1953@gmail.com)

**Yury P. Zarichnyack** — D.Sc., Senior Researcher, Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 670151341, ORCID ID: 0000-0001-8713-3583, [zarich4@gmail.com](mailto:zarich4@gmail.com)