

03

## Сопряженный теплообмен в области постоянного объема при импульсно-периодическом подводе энергии

© К.Н. Волков,<sup>1</sup> В.Н. Емельянов,<sup>1</sup> А.Г. Карпенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет,  
190005 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: dsci@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 28 июня 2022 г.

Принято к публикации 4 июля 2022 г.

Рассмотрены возможности организации импульсно-периодического процесса с заданными частотными характеристиками в полости постоянного объема при внешнем подводе энергии к рабочей газовой смеси. Моделирование газодинамических и тепловых процессов осуществлялось при помощи численного решения сопряженной задачи теплообмена. Газовая среда описана на основе модели вязкого сжимаемого газа. Для нахождения температурного поля в стенках конструкции решено уравнение нестационарной теплопроводности. Сопряжение температурных полей в газе и твердом теле осуществлено при помощи итерационной процедуры. В расчетах варьируются геометрические параметры полости, плотность энергоподвода, начальное давление, состав рабочей смеси. Сравнены результаты расчетов, полученные в рамках одномерной и двумерной постановки задачи при действии как однократного импульса, так и серии импульсов. Полученные результаты продемонстрировали возможность реализации требуемых частотных характеристик процесса при заданных геометрических и энергетических параметрах.

**Ключевые слова:** импульсно-периодический процесс, газовый лазер, сопряженный теплообмен, численное моделирование, энергоподвод, импульс.

DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53242.78-22

### Введение

Исследование сопряженного теплообмена в полостях, заполненных средой с неоднородными параметрами, представляет интерес при разработке систем охлаждения газовых лазеров [1]. Для обеспечения постоянства состава и давления рабочего газа лазер снабжается системой газообеспечения, которая играет важную роль в механизме генерации излучения.

В газоразрядном технологическом лазере активный элемент представляет собой камеру, заполненную рабочей газовой смесью. После подвода энергии в среде остается избыточное количество тепла, которое приводит к увеличению температуры и давления газовой смеси, а также изменению физических свойств активной среды [2,3]. Перед иницированием следующего импульса необходимо осуществить отвод тепла и привести среду в исходное термодинамическое состояние. В газовых лазерах существуют два различных способа охлаждения рабочей смеси: диффузионный и конвективный. Диффузионное охлаждение активной среды обеспечивается за счет отвода тепла через охлаждаемые стенки разрядной камеры. Конвективное охлаждение осуществляется при помощи быстрой прокачки лазерной смеси через разрядную камеру. Генерирование излучения со стабильными параметрами достигается за счет применения замкнутого цикла прокачки и системы регенерации отработанной

лазерной смеси. Задачей анализа является определение таких параметров системы, при которых обеспечивается импульсно-периодическая работа с заданными частотными и энергетическими характеристиками.

Различные вопросы, связанные с реализацией математических моделей сопряженного теплообмена в замкнутых полостях, обсуждаются в работе [4]. Сопряженная задача теплообмена в цилиндрической оребренной трубе решается в работе [5]. Полученные результаты позволяют оценить прогрев жидкости по длине канала, а также перепад температур на стенках трубы. Сопряженный теплообмен при движении вязкой несжимаемой жидкости в открытой полости с учетом охлаждения внешнего контура моделируется в работе [6]. Двумерное описание конвективного стационарного теплообмена высокотемпературной цилиндрической поверхности, охлаждаемой потоком жидкости, рассматривается в работе [7]. Сопряженный теплообмен в полостях, образованных подвижными и неподвижными стенками, моделируется в работе [8]. Вопросы, связанные с численным моделированием сопряженного теплообмена в замкнутых областях при локальном энерговыделении в потоке, обсуждаются в работах [9–13].

В настоящей работе рассматривается возможность реализации импульсно-периодических процессов в области постоянного объема, заполненной газовой смесью. Решение задачи в одномерной постановке дает пред-

варительную оценку уровня температуры при подводе энергии в активную смесь и предоставляет начальные данные для решения задачи об изменении состояния газовой смеси при развитии в ней газодинамических процессов, процессов теплопереноса и процессов теплообмена с конструкцией. Для более точной оценки уровня температур в рабочей полости используется двумерная модель. На основе анализа результатов численного моделирования в полостях различной геометрической формы делается заключение о возможности организации импульсно-периодического процесса с заданными частотными характеристиками.

## 1. Математическая модель

В полости находится рабочая смесь диоксида углерода и гелия. Варьируются полное давление смеси и парциальные давления ее компонентов. В полость вводится лазерный импульс, для которого задается зависимость интенсивности от времени. В расчетах применяется импульс трапециевидальной формы с эффективной продолжительностью  $2\mu\text{s}$ .

Рассматривается возможность реализации импульсно-периодического процесса в области постоянного объема (обмен газом с внешней средой отсутствует). Импульс накачки проходит через полость, отражается от зеркала и возвращается к окну своего входа. Охлаждение газовой смеси осуществляется за счет ее теплообмена с конструктивными элементами полости. Состояние газовой компоненты определяется как внешним воздействием, так и сопряженным теплообменом с ограничивающими стенками. Поскольку характерное время протекания лазерных процессов намного меньше, чем характерное время тепловых процессов, предполагается мгновенный подвод тепла в газовую смесь.

Для численного исследования используется совокупность математических моделей. Для воспроизведения отдельных элементов процесса применяются различные упрощения, которые относятся к размерности задачи (одномерная или двумерная), учету различных факторов (теплообмена, конвекции, излучения). Существенным элементом моделей является учет нестационарности процесса. Газовая среда рассматривается как смесь идеальных газов. Термодинамические характеристики и свойства газовой компоненты являются функциями состава смеси и температуры в рассматриваемой точке. Термодинамические характеристики свойства компонентов газовой смеси представляются в виде полиномов по степеням температуры.

Расчетная область состоит из газовой полости и ограничивающих ее стенок. Для нахождения распределения температуры и газодинамических параметров в газовой полости решается нестационарная задача газовой динамики, а для нахождения распределения температуры в ограничивающих конструкцию стенках —

нестационарное уравнение теплопроводности. На внешних границах расчетной области используются условия свободно-конвективного теплообмена и радиационного теплообмена с окружающей средой, а на внутренних границах, контактирующих с газовой средой — условия теплового сопряжения (равенство тепловых потоков и температур).

Система уравнений газовой динамики решается численно на основе схемы расщепления по физическим процессам, элементами которой является конвективный перенос, подвод энергии и теплообмен с конструкцией. Конвективные потоки определяются на основе схемы распада произвольного разрыва. Граничные условия ставятся в характеристическом виде, учитывающем взаимодействие волн давления с входной и выходной границами области. Нелинейное уравнение теплопроводности решается с помощью неявной разностной схемы, имеющей второй порядок аппроксимации по пространству и первый порядок по времени. Нелинейности приписываются нижнему временному слою, а радиационные условия линейризуются. На этой основе реализована безытерационная разностная схема, разрешаемая на каждом шаге обращением матрицы коэффициентов.

Распределенный энергоподвод учитывается как источник член в уравнении энергии. Объемный удельный энерговклад в каждый момент времени определяется из численного решения уравнения Бугера с учетом влияния плотности среды на коэффициент поглощения. Для парциального давления углекислого газа  $1\text{ atm}$  и температуры  $300\text{ K}$  значение коэффициента поглощения полагается равным  $k = 36.67\text{ m}^{-1}$ . Интенсивность лазерного импульса составляет  $I_0 = 3.7 \cdot 10^{10}\text{ W/cm}^2$ .

## 2. Одномерная модель

В плоскую щель высотой  $h$ , заполненную активной газовой средой (рис. 1), равномерно по сечению подводится энергия с объемной интенсивностью  $Q$  и интервалом подвода  $\Delta t$ . Стенки щели полагаются либо медными, либо одна из них изготовлена из меди, а другая представляет собой оптическое стекло. Толщина стенок, ограничивающих полость, составляет  $20\text{ mm}$ . Подвод тепла характеризуется объемной плотностью энергоподвода с заданной частотой ( $f = 10\text{ Hz}$ ). Время

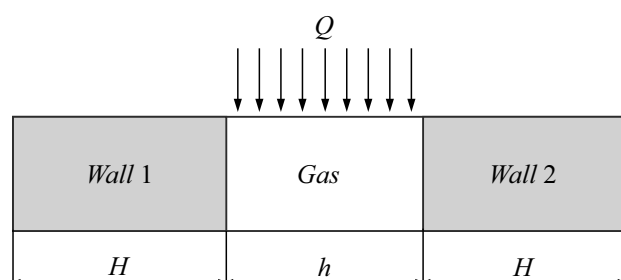


Рис. 1. Геометрия расчетной области.

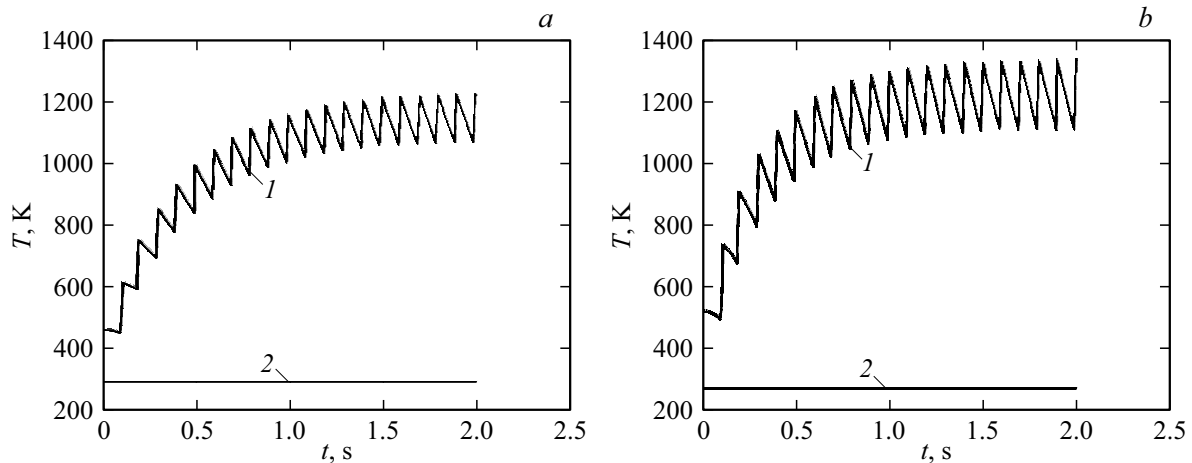


Рис. 2. Распределения температуры во времени при  $h = 5 \text{ mm}$ ,  $Q = 1 \text{ J/cm}^3$  (a) и  $Q = 2 \text{ J/cm}^3$  (b).

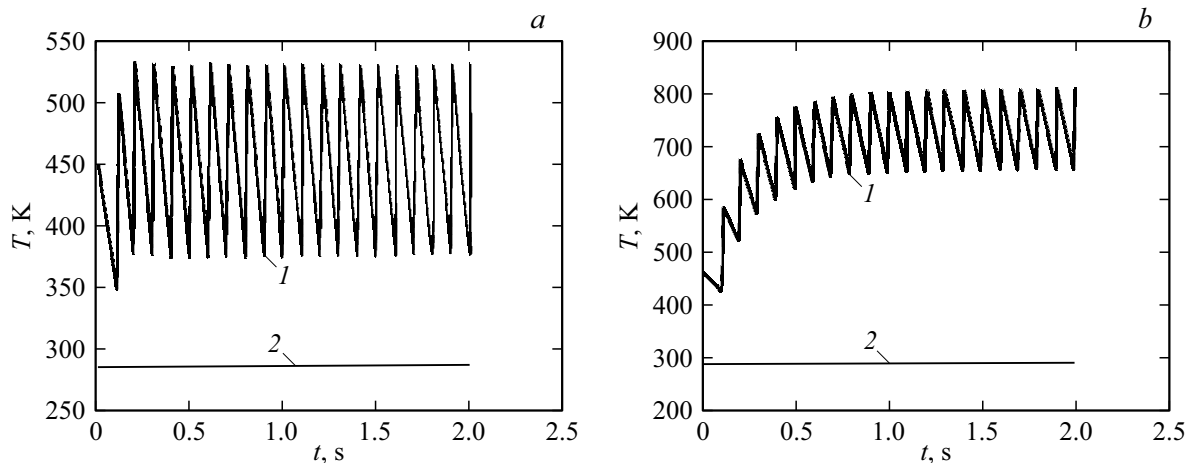


Рис. 3. Распределения температуры во времени при  $h = 3 \text{ mm}$ ,  $Q = 1 \text{ J/cm}^3$  (a) и  $Q = 2 \text{ J/cm}^3$  (b).

работы системы принимается равным 2 s, что соответствует 20 импульсам энергоподвода.

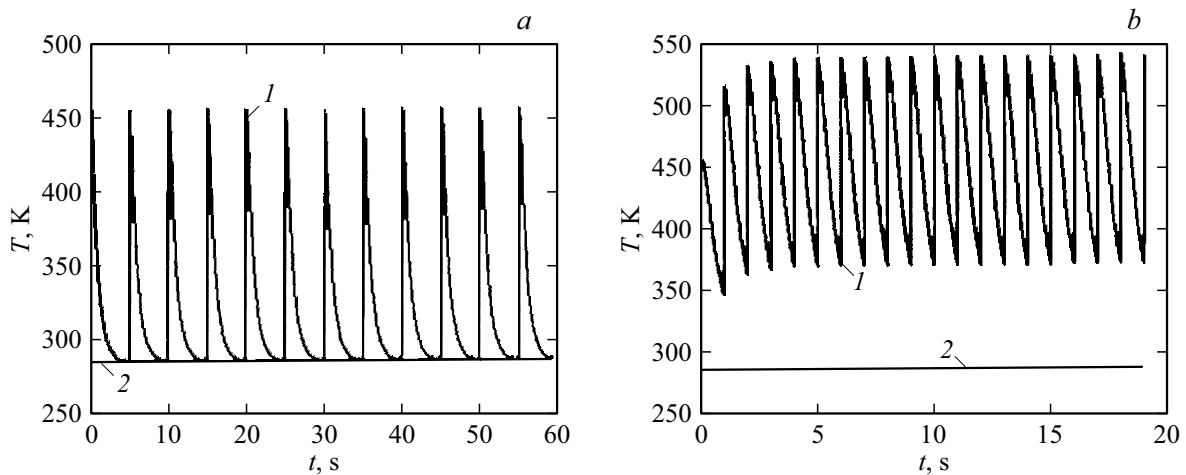
Расчеты проводятся для газовой смеси  $0.9\text{He} + 0.1\text{CO}_2$ , находящейся при давлении  $p = 10 \text{ atm}$ . Ширина газовой полости полагается равной  $h = 5 \text{ mm}$ . Интенсивность подвода энергии составляет  $Q = 1 \text{ J/cm}^3$ .

Температура в щели в начальный момент принимает высокое значение, соответствующее величине подведенной энергии. Далее происходит остывание газовой среды за счет теплопроводности. В том случае, когда промежуток времени между импульсами недостаточен для термического восстановления системы, температура в полости к началу следующего импульса превышает исходное значение. Динамика изменения температуры в средней точке полости при разогреве газа в полости сериями последовательных импульсов показана на рис. 2 и 3 для различных размеров газовой полости и интенсивности энергоподвода. Линии 1 соответствуют газовой полости, а линии 2 — стенке. При действии достаточно большой серии импульсов система выходит на определенный режим, в котором она успевает сбрасывать

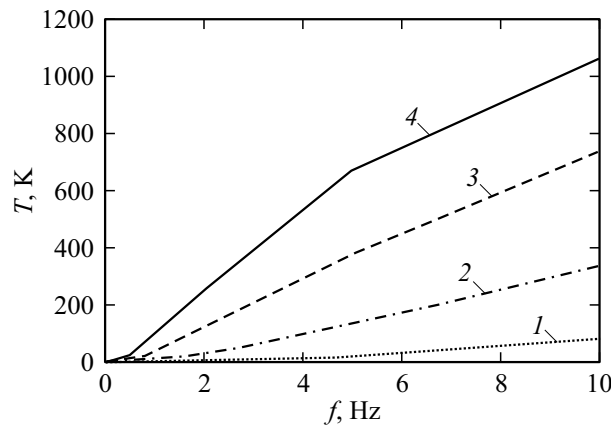
тепло от очередного импульса энергоподвода. При этом устанавливаются постоянные значения максимальной температуры после действия очередного импульса и температуры в середине полости перед действием очередного импульса.

Изменение температуры в середине щели, имеющей ширину 10 mm, для серии из 12 импульсов с частотой 0.2 Hz показывает рис. 4, a. Линии 1 соответствуют газовой полости, а линии 2 — стенке. За время, равное периоду между импульсами, происходит полное восстановление состояния газа. Тепло отводится в стенку за счет теплопроводности. При увеличении частоты импульсов газ не успевает восстановить свое исходное термодинамическое состояние. На рис. 4, b приводится зависимость температуры в средней точке газовой полости от времени для процесса с частотой 1 Hz.

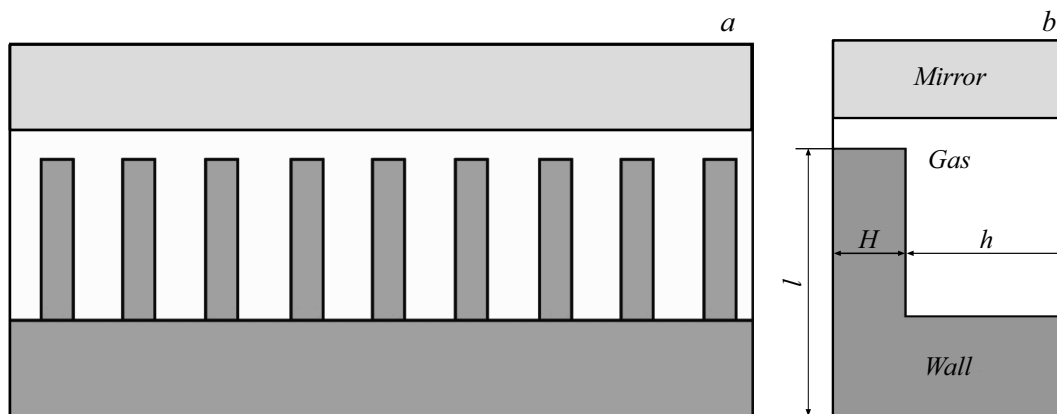
Температура отличается от исходной температуры на некоторую величину  $\Delta T$ , которая зависит от частоты импульсно-периодического процесса. Уменьшение высоты канала приводит к увеличению отвода тепла.



**Рис. 4.** Изменения температуры во времени в серединной точке газовой полости при  $Q = 1 \text{ J/cm}^3$ . Интервал между импульсами составляет 5 (a) и 1 s (b).



**Рис. 5.** Приращение температуры в полости после 10 последовательных импульсов в зависимости от частоты при  $h = 3$  (1); 5 (2); 7.5 (3); 10 mm (4).



**Рис. 6.** Конструкция полости (a) и расчетная область (b).

На рис. 5 приводятся значения температуры газа в серединной точке полости после 10 последовательных импульсов в зависимости от частоты процесса. При малой высоте канала представляется возможным обес-

печить частоту импульсно-периодического процесса на уровне 10 Hz. Однако критичным является вопрос о возможности оптической реализации процесса в канале с такими геометрическими характеристиками.

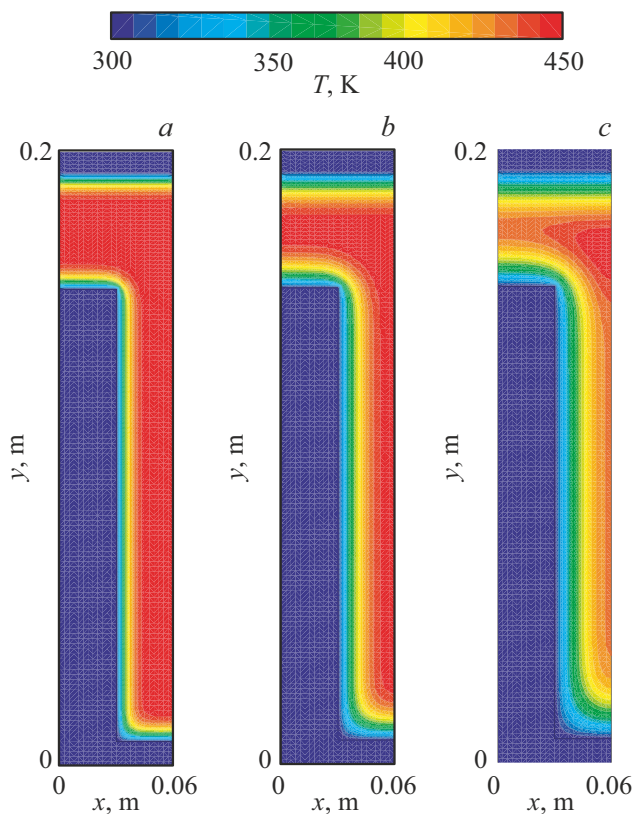


Рис. 7. Поле температуры после окончания действия импульса в моменты времени  $t = 0.02$  (a),  $0.06$  (b),  $0.1$  s (c).

### 3. Двумерная модель

Рассматриваются нестационарные тепловые процессы при импульсном подводе энергии в рабочую область, состоящую из медной и кварцевой поверхностей, между которыми находится рабочая смесь диоксида углерода и гелия  $0.9\text{He} + 0.1\text{CO}_2$  (рис. 6, a). В рабочее пространство

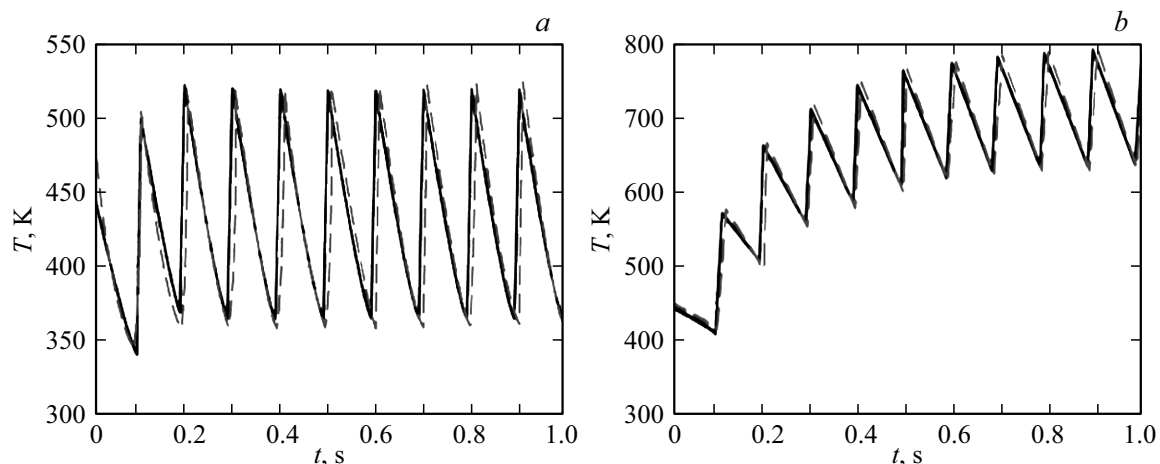


Рис. 8. Сравнение распределений температуры, полученных на основе двумерной (штриховые линии) и одномерной (сплошные линии) моделей, при  $Q = 1$  (a) и  $2\text{J}/\text{cm}^3$  (b).

погружены элементы, предназначенные для отвода тепла от газа. Газодинамические и тепловые процессы моделируются в расчетной области, показанной на рис. 6, b. Ширина области полагается равной  $h = 3$  mm, толщина ребра —  $H = 3$  mm, а высота области —  $L = 15$  mm. В расчетах задается импульс, определяющий распределение объемного энерговклада трапециевидальной формы с эффективной продолжительностью  $2\mu\text{s}$ . Начальная температура системы составляет 285 K.

Динамику теплового восстановления системы после окончания действия одиночного импульса показывает рис. 7. С течением времени происходит размытие температурного поля и уменьшение максимального уровня температур в полости.

Влияние величины энергоподвода на динамику системы показывает рис. 8. Для наглядности представления результатов, соответствующих моделям различной геометрической размерности, моменты прихода импульсов немного смещены друг относительно друга. Наблюдается достаточно точное совпадение результатов расчетов, полученных в рамках одномерной и двумерной модели. При этом максимальная разница в значениях температуры системы при импульсно-периодическом подводе энергии не превышает 0.85%.

### Заключение

Для организации импульсно-периодического процесса используется объем с постоянной порцией газовой смеси. После подвода энергии в системе развиваются тепловые и газодинамические процессы. Характер этих процессов определяется геометрической формой области, конструкцией и материалом ограничивающих стенок, через которые обеспечивается теплоотвод. Пространственная неравномерность подвода энергии приводит к существенному увеличению скоростей газа, что интенсифицирует теплообмен и способствует повышению

частоты импульсно-периодического процесса, а также оказывает влияние на оптические характеристики среды.

Разработаны математические модели и создано программное обеспечение, позволяющее моделировать тепловые и газодинамические процессы в полости импульсно-периодической системы без протока газа. Проведено параметрическое исследование теплового состояния газовой смеси при подводе энергии сериями импульсов в активных средах высокого давления для оценки предельных значений частоты повторения импульсов лазерного излучения. Динамика температурного поля исследована в зависимости от геометрических размеров активной среды и конструкции лазерной полости при отсутствии конвективного сноса газового потока. На основе анализа результатов численного моделирования показана возможность организации импульсно-периодического процесса с заданными частотными характеристиками в системах с постоянным (незаменимым) активным газовым компонентом. Результаты расчетов, полученные в рамках одномерной и двумерной модели, достаточно хорошо согласуются между собой.

При импульсном подводе энергии с ее неравномерным распределением по сечению возникают переходные газодинамические процессы со значительными градиентами параметров. Определены размеры полости, обеспечивающие импульсно-периодическую работу системы. Полости, выполненные с теплоотводящими элементами, позволяют осуществить широкое варьирование геометрическими размерами для оптимизации лазерных процессов. Перспективными в смысле термического восстановления среды являются схемы с протоком рабочего тела. Техническая реализация такой схемы требует проведения дальнейших исследований.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00657), <https://rscf.ru/project/21-19-00657/>.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. *Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях*. (Физматлит, М. 2010), 488 с. [K.N. Volkov, V.N. Emelaynov. *Flows and heat transfer in channels and rotating cavities*. (Publishing House of Physical and Mathematical Literature, M, 2009).]
- [2] V.N. Emelyanov, I.V. Teterina, K.N. Volkov, M.S. Yakovchuk. *Acta Astronautica*, **150**, 144 (2018). DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.11.031
- [3] V.N. Emelyanov, A.V. Pustovalov, K.N. Volkov. *Acta Astronautica*, **163**, 232 (2019). DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.014
- [4] К.Н. Волков. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, **53** (4), 656 (2013). DOI: 10.7868/S0044466913040145 [K.N. Volkov. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, **53** (4), 656 (2013). DOI: 10.1134/S0965542513040106]
- [5] Е.С. Байметова, А.Ф. Гиззатуллина, Ф.Н. Пушкарев. *Химическая физика и мезоскопия*, **23** (2), 154 (2021). DOI: 10.15350/17270529.2021.2.14 [E.S. Baimetova, A.F. Gizzatullina, F.N. Pushkarev. *Chemical Physics and Mesoscopy*, **23** (2), 154 (2021). DOI: 10.15350/17270529.2021.2.14]
- [6] Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. *Теплофизика и аэромеханика*, **1**, 123 (2009). [G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet. *Thermophysics and Aeromechanics*, **16** (1), 119 (2009). DOI: 0.1007/s11510-009-0012-z]
- [7] H. Liu, X. Zhang, L. Xu, M. Wang. *J. Thermal Sci.*, **11** (1), 65 (2002). DOI: 10.1007/s11630-002-0024-2
- [8] К.Н. Волков. *Инженерно-физический журнал*, **83** (2), 273 (2010). [K.N. Volkov. *J. Engineer. Phys. Thermophys.*, **83** (2), 291 (2010). DOI: 10.1007/s10891-010-0344-0]
- [9] R.N. Mathews, C. Balaji. *Intern. Commun. in Heat and Mass Transfer*, **33**, 908 (2006). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.02.013
- [10] Y.P. Cheng, T.S. Lee, H.T. Low. *Appl. Thermal Engineer.*, **28**, 1826 (2008). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.11.008
- [11] W. Zhang, C. Zhang, G. Xi. *Intern. J. Heat and Fluid Flow*, **32**, 52 (2011). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.08.006
- [12] T.K. Hotta, P. Muvvala, S.P. Venkateshan. *Heat and Mass Transfer*, **49**, 207 (2013). DOI: 10.1007/s00231-012-1072-0
- [13] T. Kogawa, J. Okajima, A. Sakurai, A. Komiya, S. Maruyama. *Intern. J. Heat and Mass Transfer*, **104**, 456 (2017). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.059