

# СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В. И. Трушляков, И. Ю. Лесняк, В. А. Севоян

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Проведен обзор существующих способов сушки пористых структур, в том числе пористых металлических материалов, и выбран метод на основе электромагнитного воздействия, в частности, лазерного излучения. Разработаны рекомендации к физическим моделям процесса испарения модельной жидкости из разработанных вариантов экспериментальных образцов, моделирующих различные исследуемые пористые металлические материалы, и к экспериментальному стенду. Разработаны программа и методика проведения предварительных экспериментальных исследований процесса воздействия лазерного излучения на модельной жидкости, с учетом динамики поверхности и испарения модельной жидкости для различных вариантов экспериментальных образцов, в том числе для отработки режимов и параметров воздействия лазерного излучения. Получены предварительные экспериментальные результаты реализации разработанной программы процессов воздействия лазерного излучения на модельной жидкости для двух вариантов экспериментальных образцов.

**Ключевые слова:** испарение жидкости, сушка, теплообмен, физическая модель, пористая металлическая структура, лазерное воздействие.

## Введение

Проблема сушки элементов конструкции при производстве авиационной и ракетно-космической техники обусловлена наличием жидкости в микротрещинах в материале конструкций топливных баков и магистралей, которые приводят к коррозии и снижению прочностных характеристик. Сложность выявления жидкости в микротрещинах заключается в том, что оценить степень сушки жидкости в микротрещинах для готовых конструкций в процессе их производства в цехах завода-изготовителя практически нет возможности, т. к. величина этих остатков составляет доли процентов от массы конструкции. Существующий методический подход к сушке подобных конструкций, используемый в условиях производства ракетно-космической техники [1], основан на длительном конвективном воздействии тепловыми потоками на осушаемое изделие без оценки степени сушки. Дальнейшая эксплуатация топливных баков в части сохранения достигнутой степени сушки рассмотрена в [2, 3].

Рассмотренная проблема сушки пористых структур свойственна широкому классу объектов, например, сушка продуктов питания [4–6], строительных материалов [7, 8], угля [9, 10] и др. Существуют различные способы сушки пористых материалов, например, на основе вакуумного воздействия [11], ультразвукового [12], конвективного [8], электромагнитного СВЧ-диапазона (микроволновое) [10] и лазерного излучения [13–15] и др.

Широкое применение нашли комбинированные способы сушки, например, продуктов питания [4–6]. В работе [4] представлены результаты экс-

периментальных исследований сушки картофеля при одновременном микроволновом и вакуумном воздействии. Такое сочетание различных факторов привело к значительному сокращению времени сушки без потери качества полученных картофельных чипсов. В работе [5] использованы ультразвуковые технологии в сочетании с вакуумным и микроволновым воздействием при жарке ломтиков яблока, что привело к сокращению времени жарки, улучшению цвета и хрусткости. В работе [6] исследовано влияние конвективной сушки моркови при ультразвуковом и микроволновом излучении на кинетику процесса, общее изменение цвета и активность воды. Применение ультразвука и микроволн при конвективной сушке сократило время сушки до 81 %, при этом результаты качественного анализа показали улучшение продукта за счет ультразвука по сравнению с конвективной и микроволново-конвективной сушкой.

Сушка строительных материалов, таких как древесина, исследована в работе [7]. Определены параметры микроволнового излучения, при которых достигается оптимальный режим процесса сушки и высокое качество высушиваемой древесины. Работа [8] посвящена исследованию газодинамики ячеистого газобетона при акустико-конвективной, термоконвективной и естественной сушке. При акустико-конвективной сушке частота и интенсивность потока газа сильно влияют на динамику извлечения влаги из высушиваемых образцов. Полученные кинетические данные термоконвективной сушки имеют билinearное распределение, а их математическая обработка позволила определить скорости протекающих процессов. Процесс естественной сушки

Таблица 1. Перечень решаемых задач и эксперименты  
Table 1. List of tasks to be solved and experiments

| № | Решаемые задачи   | Эксперименты  |
|---|---|---|
| 1 | Выбор мощности ЛИ и длины волны ЛИ для используемой энергетической установки  | Определение мощности ЛИ для воздействия на МЖ из условия отсутствия разбрызгивания МЖ и попадания луча ЛИ на дно ЭО   |
| 2 | Оценка величины корпускулярной составляющей (процентное соотношение затраченной энергии на механическую работу и нагрев воды) в ЛИ при воздействии на МЖ, в том числе и динамику пузырьков при воздействии ЛИ | Регистрация наличия воронки на свободной поверхности МЖ с использованием скоростной съемки, образование пузырьков, направления и скорости их движения   |
| 3 | Определение глубины воздействия ЛИ при наличии МЖ   | Измерение расстояния от лазерной головки до поверхности индикатора, расположенного в жидкости, при котором происходит прожигание индикатора. Определение диаметра пятна на поверхности жидкости при различных расстояниях от лазерной головки до начальной поверхности жидкости |
| 4 | Определение теплового воздействия ЛИ на МЖ и стенки ЭО  | Измерение температур МЖ и ЭО. Доработка ЭО для установки датчиков температуры (термопары) с целью измерения температуры МЖ и стенки ЭО  |
| 5 | Определения оптимального режима работы установки ЛИ (импульсный — время между приложениями импульса; непрерывный)   | Сравнение импульсного и непрерывного режимов воздействий ЛИ при одинаковой введенной в МЖ энергии. Фиксация внешних факторов (наличие пара, снижение скорости испарения МЖ)   |
| 6 | Влияние обдува инертным газом (азот) поверхности МЖ на эффективность ЛИ   | Измерение интервала времени на испарение заданной массы МЖ при различных мощностях ЛИ   |
| 7 | Оценка величины энергии, поглощаемой МЖ   | Определение температур МЖ и ЭО для оценки полученной МЖ энергии с учетом тепловых потерь на испарение. Сравнение с затраченной энергией ЛИ  |

происходит очень медленно, и на скорость сушки сильно влияют параметры окружающей среды. В работе [16] проведены экспериментальные исследования сушки круглого бамбука в условиях вакуума и микроволн. Результаты показали, что скорость сушки круглого бамбука увеличивается с увеличением температуры сушки, мощности микроволн и уровня вакуума. Усадка образцов увеличивается пропорционально температуре, мощности микроволн и уровню вакуума, причем усадка в верхней части была больше, чем в нижней. Степень растрескивания круглого бамбука была низкой при использовании технологии микроволново-вакуумной сушки, демонстрируя, что эта технология может в значительной степени избежать появления трещин и обеспечить быстрое высыхание круглого бамбука. В работе [17] проведены исследования ленточной микроволновой сушки древесины. Результаты экспериментов показали, что образцы древесины, высушенные с помощью микроволн, имеют лучшее расположение микроструктуры из-за равномерного поглощения энергии, нагрева и распределения влаги.

В работах [9, 10] разработаны связанные электромагнитная модель и модель теплопередачи для микроволнового нагрева угля. Результаты моделирования показали, что после микроволнового облучения уголь постепенно нагревается из-за диэлектрических потерь. Неравномерное электромагнитное распределение и селективный микроволновый нагрев создают горячие и холодные точки, тогда как тепловая конвекция в угле гомогенизирует тепло-

вое поле. Однако в данных исследованиях не рассматриваются металлические пористые материалы, которые отражают микроволны и не являются изоляторами (например, сера) и поглотителями (например, вода).

В работах [13–15] рассматривается процесс испарения жидкости в микроканале при электромагнитном воздействии в виде лазерного излучения (ЛИ) с длиной волны 1550 нм. Температура и скорость испарения жидкости линейно увеличиваются с увеличением мощности лазера в результате большого количества выделяемого тепла. Уменьшение расстояния между лазерным пятном и передней границей раздела приводит к более высокой температуре границы раздела и скорости испарения из-за меньшего сопротивления теплопередаче.

Проведенный обзор работ по исследованию испарения жидкостей из пористых структур показал, что данное направление исследований является актуальным. Однако существующие результаты исследований воздействия ЛИ на интенсивность процесса испарения жидкости из пористых металлических структур ограничены размерами пор и параметрами ЛИ.

### Постановка задачи

Цель предлагаемой работы заключается в создании научно-методического и экспериментального обеспечения исследования процессов воздействия ЛИ на жидкость, в том числе оценку степени осушки и возможности ее экспериментального опреде-

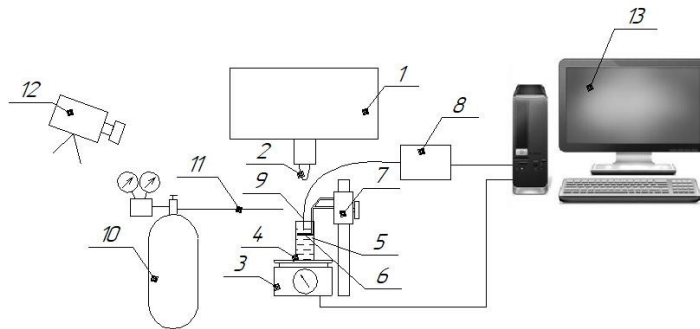


Рис. 1. Состав экспериментального стенда:

- 1 — лазерная установка; 2 — головка лазерного излучателя;  
 3 — лабораторные весы; 4 — экспериментальный образец; 5 — модельная жидкость;  
 6 — индикатор; 7 — штатив; 8 — измеритель температуры; 9 — термопара;  
 10 — баллон с азотом; 11 — патрубок подачи азота; 12 — скоростная видеокамера;  
 13 — компьютер для регистрации и обработки измерений

Fig. 1. The composition of the experimental stand:

- 1 — laser installation; 2 — head of the laser emitter; 3 — laboratory scales;  
 4 — experimental sample; 5 — model liquid; 6 — indicator; 7 — tripod;  
 8 — temperature meter; 9 — thermocouple; 10 — nitrogen bottle; 11 — nitrogen supply pipe;  
 12 — high-speed video camera; 13 — computer for registration and processing of measurements

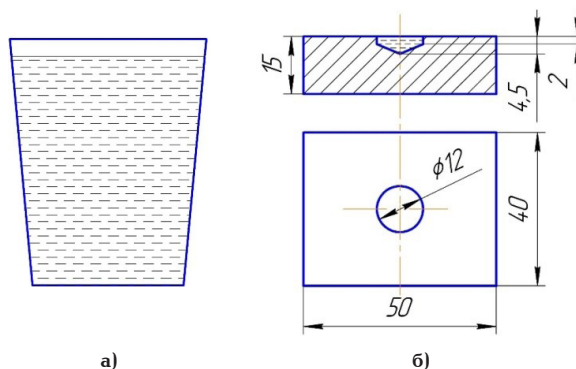


Рис. 2. Экспериментальные образцы в виде:

- а) стеклянной мензурки; б) металлической пластины

Fig. 2. Experimental samples in the form of:

- а) glass beaker; б) metal plate

ления. Для реализации сформулированной цели на первых этапах исследования необходимо решение следующих задач:

1. Разработка программы предварительных экспериментальных исследований, направленных на отработку экспериментального стенда, экспериментальных образцов (ЭО), моделирующих пористые структуры и методики проведения экспериментов, используя модельную жидкость (МЖ).

2. Формирование требований к экспериментальному стенду, ЭО на основе разработанной программы экспериментов, в том числе как для отработки методики проведения экспериментов, так и для исследования процессов, проходящих в моделируемых реальных пористых структурах.

3. Разработка требований к метрологическому обеспечению и методике обработки результатов измерения воздействия ЛИ на МЖ.

4. Проведение предварительных экспериментов.

#### Программа предварительных экспериментальных исследований

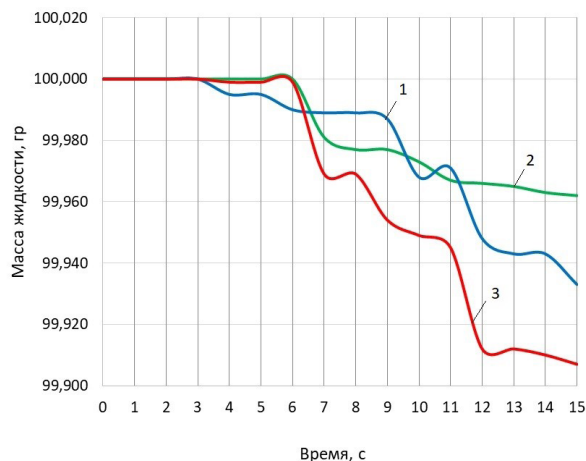
В соответствии с целями предлагаемого исследования в программу предварительных экспери-

ментальных исследований включены следующие решаемые задачи и, соответственно, эксперименты, приведенные в табл. 1.

#### Состав экспериментального стенда

Для проведения экспериментальных исследований воздействия ЛИ на процесс испарения МЖ из пористых металлических материалов (ПМС) в соответствии с представленной программой экспериментов, создан экспериментальный стенд, включающий в свой состав:

- источник ЛИ (лазерная установка SF-1410) с регулируемой мощностью, дискретностью работы и высотой лазерной головки над ЭО;
- лабораторные весы VM510DM-II с платформой для размещения ЭО;
- ЭО1 и ЭО2 для размещения в них МЖ и термопар;
- непромокаемый индикатор и штатив для фиксации индикатора на разных расстояниях от фокуса луча ЛИ;
- измеритель температуры МЖ с термопарами;
- система обдува газом (азот) поверхности МЖ;
- скоростная видеокамера;



**Рис. 3. Масса МЖ в ЭО1 при мощности ЛИ 60 Вт и расстоянии от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ:**  
1 — 8 мм; 2 — 10 мм; 3 — 14 мм  
**Fig. 3. ML mass in ES1 at LR power of 60 W and distance from the edge of the laser head to the initial surface of the ML:**  
1 — 8 mm; 2 — 10 mm; 3 — 14 mm

— электронный микроскоп для измерения диаметра отверстий, прожигаемых ЛИ;

— компьютер для регистрации и обработки измерений.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1.

#### Требования к экспериментальным образцам

На данном этапе рассматриваются два варианта ЭО (рис. 2):

— ЭО1 (рис. 2а) представляет из себя мензурку объемом 50 мл с нанесенной шкалой внутреннего объема, материал мензурки — прозрачное стекло. При проведении экспериментов согласно табл. 1, в ЭО1 необходимо размещать непромокаемую индикаторную бумагу на специальной подложке для фиксации индикаторной бумаги на разных высотах. С использованием ЭО1 проводятся эксперименты в соответствии с табл. 1: № 1, № 2, № 3, № 5, № 6.

— ЭО2 (рис. 2б) представляет из себя металлическую пластину, изготовленную из алюминиевого сплава, на поверхности которой имеется углубление (каверна) диаметром 12 мм и глубиной 4,5 мм со сходящейся конусностью на дне. Начальная вмещаемая масса МЖ в ЭО2 составляет 0,3 г, что позволяет с большой точностью определить количество испаряемой жидкости (погрешность лабораторных весов составляет  $\pm 0,01$  г), кроме того, зеркало МЖ на начальный момент времени воздействия ЛИ совпадает с поверхностью ЭО2. С использованием ЭО1 проводятся эксперименты в соответствии с табл. 1: № 1, № 4, № 5, № 6, № 7.

#### Методики проведения экспериментов

1. Мощность ЛИ выбирается из условия отсутствия разбрызгивания МЖ из ЭО. Для выполнения этой задачи под головкой ЛИ размещается ЭО2 с МЖ, при этом расстояние между начальной поверхностью МЖ и фокусом луча ЛИ равняется

нулю. Далее включается генератор ЛИ с заданной мощностью, параллельно ведется скоростная видеосъемка, чтобы зафиксировать все возможные брызги МЖ. Эксперимент повторяется с изменением мощности ЛИ с шагом 10 Вт, начиная с максимальной мощности 90 Вт до полного исключения разбрызгивания МЖ. После определения рабочей мощности ЛИ проводится аналогичный эксперимент с ЭО1, заполненной МЖ, с целью исключения возможного разбрызгивания МЖ из ЭО1.

2. Для оценки величины корпускулярной составляющей (процентное соотношение затраченной энергии на механическую работу и нагрев воды) в ЛИ при воздействии на поверхности МЖ, в том числе и динамику пузырьков при ЛИ, под головкой ЛИ размещается ЭО1 с МЖ, расстояние между начальной поверхностью МЖ и фокусом луча ЛИ равняется нулю. Далее включается генератор ЛИ с рабочей мощностью, параллельно ведется скоростная видеосъемка, чтобы зафиксировать наличие или отсутствие воронки на поверхности МЖ в месте попадания луча ЛИ в МЖ и динамику движения пузырьков пара внутри МЖ.

3. Для определения глубины воздействия ЛИ в МЖ под головкой лазерного излучателя размещается ЭО1 с МЖ, в ЭО1 также помещается специальная подложка с индикаторной бумагой и регулируемой высотой, после включается генератор ЛИ, луч попадает на индикаторную бумагу и оставляет след в виде прожигаемого отверстия. В месте падения луча ЛИ на металлической подложке с обратной стороны имеется запаянная термопара (изолированная от МЖ), которая регистрирует температуру подложки в этой точке. После выключения генератора проводятся замеры диаметра пятна на индикаторной бумаге. Данный эксперимент повторяется с изменением расстояния между индикаторной бумагой и фокусом лазерного луча, при этом мощность ЛИ является рабочей. Аналогичные эксперименты проводятся для определения глубины воздействия ЛИ в воздухе, в условиях отсутствия МЖ.

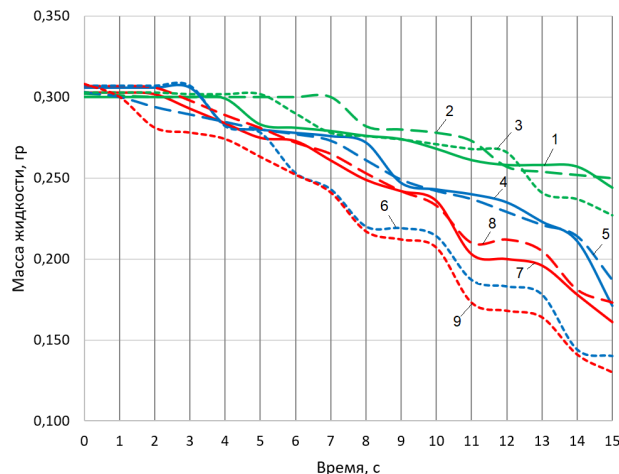


Рис. 4. Масса МЖ в ЭО2 при постоянном ЛИ с мощностью: 1 — 30 Вт (расстояние 10 мм); 2 — 30 Вт (расстояние 8 мм); 3 — 30 Вт (расстояние 14 мм); 4 — 60 Вт (расстояние 10 мм); 5 — 60 Вт (расстояние 8 мм); 6 — 60 Вт (расстояние 14 мм); 7 — 90 Вт (расстояние 10 мм); 8 — 90 Вт (расстояние 8 мм); 9 — 90 Вт (расстояние 14 мм)

Fig. 4. ML mass in ES2 at constant LR with power: 1 — 30 W (distance 10 mm); 2 — 30 W (distance 8 mm); 3 — 30 W (distance 14 mm); 4 — 60 W (distance 10 mm); 5 — 60 W (distance 8 mm); 6 — 60 W (distance 14 mm); 7 — 90 W (distance 10 mm); 8 — 90 W (distance 8 mm); 9 — 90 W (distance 14 mm)

4. Для определения теплового воздействия ЛИ на МЖ и стенки ЭО под головкой ЛИ размещается ЭО2 с МЖ, расстояние между зеркалом МЖ и фокусом луча ЛИ и мощность ЛИ заранее определены из условия отсутствия разбрызгивания МЖ и критерия оптимальности (соотношение затраченной энергии к массе испаренной МЖ) испарения МЖ. Далее включается генератор ЛИ, параллельно ведется скоростная видеосъемка процесса. Во время проведения эксперимента с помощью термопар регистрируются температуры МЖ и ЭО. После оценивается изменение температуры МЖ и ЭО в ходе проведения эксперимента.

5. Для определения оптимального режима работы установки ЛИ проводятся эксперименты по испарению МЖ из ЭО1 и ЭО2 при воздействии ЛИ в двух режимах работы установки ЛИ: импульсном (работа, покой) и непрерывном. При проведении данных экспериментов под головкой ЛИ размещается ЭО с МЖ, расстояние между зеркалом МЖ и фокусом луча ЛИ и мощность ЛИ заранее определены из условия отсутствия разбрызгивания МЖ и оптимальности (соотношение затраченной энергии к массе испаренной МЖ) испарения МЖ. При непрерывном режиме воздействия ЛИ установка включается и непрерывно воздействует на МЖ в течении определенного времени работы ( $t_p$ ). А при импульсном режиме работы генератор ЛИ включается на время импульса ( $\Delta t_p$ ) и выключается на время покоя ( $\Delta t_n$ ). При этом  $\Sigma \Delta t_p = t_p$ . В ходе проведения эксперимента контролируется суммарное время работы генератора ЛИ с заданной одинаковой мощностью и расстоянием между поверхностью МЖ и фокусом луча ЛИ, а параметры  $\Delta t_p$  и  $\Delta t_n$  варьируются от эксперимента к эксперименту. Для оценки эффективности применения того или другого режима работы за критерий принимается оптимальность испарения МЖ (соотношение затраченной энергии к массе испаренной МЖ).

6. После определения всех оптимальных параметров воздействия ЛИ на процесс испарения, в том числе и режим работы генератора ЛИ, в состав установки вводится система для обдува поверхности МЖ инертным газом (азот) для определения его влияния на эффективность воздействия ЛИ. Критерий эффективности: оптимальность испарения МЖ.

7. Для оценки величины энергии, поглощаемой МЖ, регистрируются температуры в МЖ, ЭО и учитываются тепловые потери на испарение МЖ. После полученная величина энергии сравнивается с затраченной энергией ЛИ.

После получения результатов экспериментов и их сравнительного анализа с теоретическими результатами планируется проведение экспериментальных исследований воздействия ЛИ на процесс испарения МЖ с применением ЭО более сложных форм.

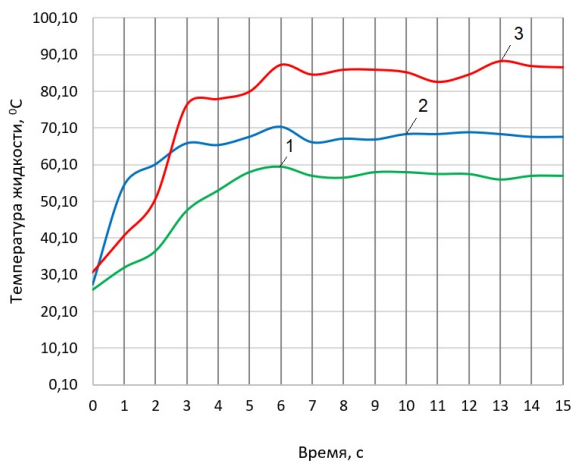
#### Разработка требований к метрологическому обеспечению и методике обработки результатов измерения воздействия ЛИ на МЖ

В качестве измеряемых параметров при проведении экспериментальных исследований выбраны:

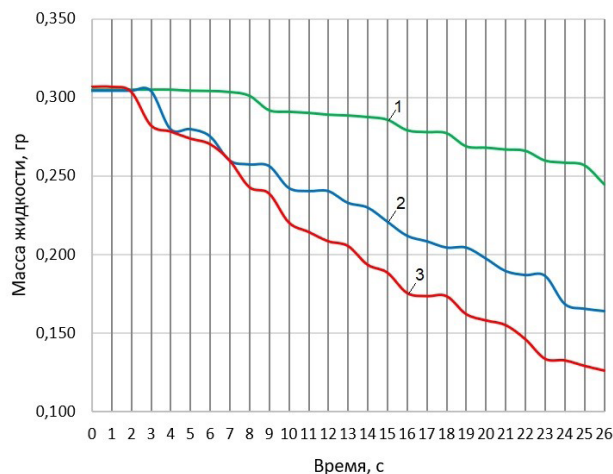
- температура МЖ с точностью  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ ;
- масса МЖ с точностью  $\pm 0,005$  г;
- температура корпуса ЭО (ЭО1, ЭО2) с точностью  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ ;
- мощность ЛИ, которая задается программным методом до включения ЛИ.

Состав метрологического оборудования:

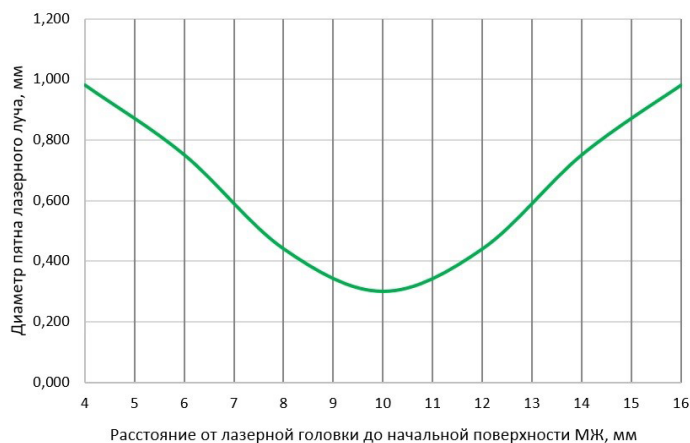
- термопары ТХА 0006-20.02 «Эталон»;
- многоканальный измеритель температуры МИТ-12;
- лабораторные весы ВМ510ДМ-II;
- мензурка с нанесенной шкалой внутреннего объема.



**Рис. 5. Температура МЖ в ЭО2 при постоянном ЛИ мощностью: 1 — 30 Вт; 2 — 60 Вт; 3 — 90 Вт**  
**Fig. 5. ML temperature in ES2 at constant LR power: 1 — 30 W; 2 — 60 W; 3 — 90 W**



**Рис. 6. Масса МЖ в ЭО2 при импульсном ЛИ с мощностью: 1 — 30 Вт; 2 — 60 Вт; 3 — 90 Вт**  
**Fig. 6. ML mass in EO2 with pulsed LI with power: 1 — 30 W; 2 — 60 W; 3 — 90 W**



**Рис. 7. Изменение диаметра пятна луча ЛИ мощностью 20 Вт в зависимости от расстояния от лазерной головки до начальной поверхности МЖ**  
**Fig. 7. Change in the spot diameter of the 20 W LR beam depending on the distance from the laser head to the initial surface of the ML**

### Результаты предварительных экспериментов

На основе проведенных предварительных экспериментов по испарению МЖ в ЭО1 и ЭО2 получены следующие результаты:

1. Изменение массы МЖ в ЭО1 при постоянном ЛИ и варьировании расстояния от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ (рис. 3).
2. Изменение массы МЖ в ЭО2 при постоянном ЛИ, варьировании мощности ЛИ и расстояния от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ (рис. 4).
3. Изменение температуры МЖ в ЭО2 при постоянном ЛИ с различной мощностью и расстоянием от лазерной головки до начальной поверхности МЖ 10 мм (рис. 5).
4. Изменение массы МЖ в ЭО2 при импульсном ЛИ с различной мощностью и расположением лазерной головки над поверхностью МЖ на расстоянии 10 мм (рис. 6).

5. Изменение диаметра пятна луча ЛИ на поверхности МЖ при различных расстояниях от лазерной головки до начальной поверхности МЖ при мощности ЛИ 20 Вт (рис. 7).

### Обсуждение полученных результатов

На рис. 3 видно, что изменение расстояния от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ влияет на изменение массы МЖ. При расстоянии 8 мм испарилось 0,067 г МЖ, при 10 мм — 0,038 г, а при 14 мм — 0,093 г. Скорость испарения МЖ зависит от размера пятна лазерного луча на поверхности МЖ. При расстоянии 8 мм диаметр пятна лазерного луча составляет 0,44 мм, при 10 мм — 0,3 мм, 14 мм — 0,75 мм (рис. 7). Поэтому при расстоянии 14 мм испарилось больше всего МЖ.

При увеличении мощности ЛИ с 30 до 60 и 90 Вт при расстоянии от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ 10 мм (рис. 4, кривые 1; 4; 7),

масса остатков жидкости на ЭО2 ЛИ составляет 0,244 г; 0,171 г и 0,161 г соответственно. При уменьшении расстояния от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ на 2 мм (рис. 4, кривые 2; 5; 8) масса оставшейся жидкости на ЭО2 составляет при 30 Вт — 0,250 г; 60 Вт — 0,187 г; 90 Вт — 0,173 г. При увеличении расстояния от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ на 4 мм (рис. 4, кривые 3; 6; 9) масса оставшейся жидкости на ЭО2 составляет при 30 Вт — 0,227 г; 60 Вт — 0,140 г; 90 Вт — 0,130 г. При этом скорость испарения жидкости относительно первого варианта расположения лазерной головки от начальной поверхности жидкости 10 мм увеличивается на 30% при 30 Вт; на 24% при 60 Вт; на 22% при 90 Вт. Поскольку лазерный луч имеет вид сходящегося и расходящегося конуса от фокусной точки лазерного луча, то при увеличении расстояния от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ происходит увеличение площади воздействия лазерного луча на жидкость. Следовательно, оптимальным расстоянием от края лазерной головки до начальной поверхности жидкости является 14 мм, при котором скорость испарения МЖ максимальная.

На рис. 5 видно, что при увеличении мощности ЛИ с 30 Вт до 60 Вт температура МЖ увеличивается на 15%, с 30 Вт до 90 Вт на 52%.

При импульсном ЛИ (рис. 6) масса оставшейся МЖ на ЭО2 составляет при мощности 30 Вт — 0,255 г; 60 Вт — 0,164 г; 90 Вт — 0,126 г. Сравнительный анализ оставшейся массы МЖ при импульсном (рис. 6) и постоянном (рис. 4) режимах ЛИ показал, что при импульсном ЛИ МЖ испарилось больше на 4 % при 60 Вт и на 22 % при 90 Вт. При мощности ЛИ 30 Вт МЖ испарилось одинаково при импульсном и постоянном режимах ЛИ.

### Выводы

1. Проведен обзор существующих способов осушки ПМС, в том числе пористых металлических материалов и выбран метод на основе электромагнитного воздействия, в частности ЛИ.

2. Разработаны рекомендации к физическим моделям процесса испарения МЖ из созданных вариантов экспериментальных образцов, моделирующих различные исследуемые ПМС.

3. Разработаны программа и методика проведения предварительных экспериментальных исследований процесса воздействия ЛИ на МЖ с учетом динамики поверхности и испарения МЖ для различных вариантов ЭО, в том числе для отработки режимов и параметров воздействия ЛИ.

4. Проведены экспериментальные исследования и получены зависимости изменения массы и температуры МЖ от мощности ЛИ и расстояния от края лазерной головки до начальной поверхности МЖ при импульсном и постоянном режимах работы ЛИ для двух вариантов ЭО.

### Благодарности

Исследования проведены в рамках государственного задания № 2019-0251 от 02.03.2020 г. «Исследование процессов испарения жидкостей в топливных баках ракет-носителей для повышения экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с жидкостными ракетными двигателями».

1. ОСТ 92–0019–78. Методы и режимы сушки изделий перед испытаниями на герметичность. Введ. 1979–10–01. Ленинград: ГОНТИ-2, 1979. 80 с.

2. ГОСТ 9.014–78. Единая система защиты от коррозии и старения. Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования. Введ. 1980–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 64 с.

3. Бронштейн В. М., Красночуб Е. К., Маркин А. А. Исследование влажностного режима в топливных баках ракет-носителей тяжелого класса во время хранения и авиационного транспортирования // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. 2009. № 3-2 (19). С. 352–359.

4. Monteiro R. L., de Moraes J. O., Domingos J. D. [et al.]. Evolution of the physicochemical properties of oil-free sweet potato chips during microwave vacuum drying // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 63. 102317. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102317.

5. Al Faruq A., Zhang M., Adhikari B. A novel vacuum frying technology of apple slices combined with ultrasound and microwave // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 52. P. 522–529. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.033.

6. Kroehnke J., Szadzińska J., Stasiak M. [et al.]. Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots — Process kinetics and product's quality analysis // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 48. P. 249–258. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.040.

7. Мелехов В. И., Шульгин В. А. Контроль процесса сушки пиломатериалов в СВЧ-лесосушильной камере резонаторного типа // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 1 (349). С. 122–130. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.122.

8. Zhilin A. A., Fedorov A. V. Acoustoconvective drying of cellular gas concrete // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90, no. 6. P. 1412–1426. DOI: 10.1007/s10891-017-1700-0.

9. Lin B., Li H., Chen Z. [et al.]. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 126. P. 949–962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.012.

10. Li H., Shia S., Lin B. [et al.]. A fully coupled electromagnetic, heat transfer and multiphase porous media model for microwave heating of coal // Fuel Processing Technology. 2019. Vol. 189. P. 49–61. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.03.002.

11. Trushlyakov V. I., Panichkin A. V., Lesnyak I. Y. [et al.]. Theoretical and experimental investigations on dynamics of liquid evaporation process in closed volume under acoustic-vacuum exposure // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 162. 120288. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120288.

12. Trushlyakov V. I., Novikov A. A., Lesnyak I. Y. [et al.]. Study of acoustic and low-pressure exposure on the temperature of the evaporation of a liquid with free interface before it freezes // The Journal of the Acoustical Society of America. 2019. Vol. 146, Issue 5. P. 3333–3338. DOI: 10.1121/1.5131643.

13. Wang Z., Li S., Chen R. [et al.]. Simulation on the dynamic flow and heat and mass transfer of a liquid column induced by the IR laser photothermal effect actuated evaporation in a microchannel // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 113. P. 975–983. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.123.

14. Xu Q., Chen R., Wang H. [et al.]. IR laser induced evaporation from a microchannel // Chemical Engineering Science. 2015. Vol. 130. P. 31–40. DOI: 10.1016/j.ces.2015.03.011.

15. Li S., Chen R., Zhu X. [et al.]. Numerical investigation of the convection during the liquid column evaporation in microchannels IR laser heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 101. P. 970–980. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.119.

16. Lv H.-F., Ma X.-X., Zhang B. [et al.]. Microwave-vacuum drying of round bamboo: A study of the physical properties // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 211. P. 44–51. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.221.

17. Vongpradubchai S., Rattanadecho P. The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2009. Vol. 48, Issue 5. P. 997–1003. DOI: 10.1016/j.cep.2009.01.008.

---

**ТРУШЛЯКОВ Валерий Иванович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 2910-2159

AuthorID (РИНЦ): 9914

AuthorID (SCOPUS): 56454317700

ResearcherID: D-7270-2015

Адрес для переписки: vatrushlyakov@yandex.ru

**ЛЕСНЯК Иван Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиноведение».

SPIN-код: 6114-0646

ResearcherID: E-6397-2014

Адрес для переписки: lesnyak.ivan@gmail.com

**СЕВОЯН Вардан Артурович**, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 2063-4032

ORCID: 0000-0002-9222-6108

ResearcherID: T-6437-2018

Адрес для переписки: vardan.sevoyan@bk.ru

#### Для цитирования

Трушляков В. И., Лесняк И. Ю., Севоян В. А. Создание экспериментальной базы для исследования влияния лазерного излучения на интенсивность процесса испарения жидкости из пористых металлических структур // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 2. С. 88–97. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-88-97.

Статья поступила в редакцию 23.04.2021 г.

© В. И. Трушляков, И. Ю. Лесняк, В. А. Севоян



# CREATION OF EXPERIMENTAL BASE FOR INVESTIGATION THE EFFECT OF LASER RADIATION ON INTENSITY OF PROCESS OF EVAPORATION OF LIQUID FROM POROUS METAL STRUCTURES

V. I. Trushlyakov, I. Yu. Lesnyak, V. A. Sevoyan

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

**A review of existing methods for drying porous structures including porous metallic materials, is carried out, and a method based on electromagnetic action, in particular, laser radiation, is selected. Recommendations have been developed for physical models of the evaporation process of a model liquid from the developed versions of experimental samples that simulate various investigated porous metallic materials, an experimental stand. A program and methodology have been developed for preliminary experimental studies of the process of exposure to laser radiation on model liquid taking into account the dynamics of the surface and evaporation of model liquid for various experimental samples options including for working out the modes and parameters of laser radiation exposure. Preliminary experimental results have been obtained for the implementation of the developed program of the processes of laser radiation influence on the breast for two variants of experimental samples.**

**Keywords:** liquid evaporation, drying, heat and mass transfer, physical model, porous metal structure, laser action.

## Acknowledgments

The work is performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 2019-0251 «Research of liquid vaporization processes in the fuel tanks of launch vehicles to improve the environmental safety and economic efficiency of launch vehicles with liquid-propellant rocket engines».

## References

1. OST 92–0019–78. Metody i rezhimy sushki izdeliy pered ispytaniyami na germetichnost' [Methods and modes of drying products before testing for tightness]. Leningrad, 1979. 80 p. (In Russ.).
2. GOST 9.014–78. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Vremennaya protivokorroziionnaya zashchita izdeliy. Obshchiye trebovaniya [Unified system of protection against corrosion and aging. Temporary anti-corrosion protection of products. General requirements]. Moscow, 1989. 64 p. (In Russ.).
3. Bronshtein V. M., Krasnochub E. K., Markin A. A. Issledovaniye vlazhnostnogo rezhima v toplivnykh bakakh raket-nositeley tyazhelogo klassa vo vremya khraneniya i aviatsionnogo transportirovaniya [Research of the wet condition in fuel tanks of high weight booster rockets during storage and aviation transportation periods] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2009. No. 3-2 (19). P. 352–359. (In Russ.).
4. Monteiro R. L., de Moraes J. O., Domingos J. D. [et al.]. Evolution of the physicochemical properties of oil-free sweet potato chips during microwave vacuum drying // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 63. 102317. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102317. (In Engl.).
5. Al Faruq A., Zhang M., Adhikari B. A novel vacuum frying technology of apple slices combined with ultrasound and

microwave // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 52. P. 522–529. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.033. (In Engl.).

6. Kroehnke J., Szadzińska J., Stasiak M. [et al.]. Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots — Process kinetics and product's quality analysis // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 48. P. 249–258. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.040. (In Engl.).

7. Melekhov V. I., Shulgin V. A. Kontrol' protsessa sushki pilomaterialov v SVCh-lesosushil'noy kamere rezonatornogo tipa [Control of drying sawn timber process in the microwave-wood drying chamber of the resonator type] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 2016. No. 1 (349). P. 122–130. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.122. (In Russ.).

8. Zhilin A. A., Fedorov A. V. Acoustoconvective drying of cellular gas concrete // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90, no. 6. P. 1412–1426. DOI: 10.1007/s10891-017-1700-0. (In Engl.).

9. Lin B., Li H., Chen Z. [et al.]. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 126. P. 949–962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.012. (In Engl.).

10. Li H., Shia S., Lin B. [et al.]. A fully coupled electromagnetic, heat transfer and multiphase porous media model for microwave heating of coal // *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 189. P. 49–61. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.03.002. (In Engl.).

11. Trushlyakov V. I., Panichkin A. V., Lesnyak I. Y. [et al.]. Theoretical and experimental investigations on dynamics of liquid evaporation process in closed volume under acoustic-vacuum exposure // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 162. 120288. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120288. (In Engl.).

12. Trushlyakov V. I., Novikov A. A., Lesnyak I. Y. [et al.]. Study of acoustic and low-pressure exposure on the temperature of the evaporation of a liquid with free interface before it freezes // *The Journal of the Acoustical Society of America*.

2019. Vol. 146, Issue 5. P. 3333–3338. DOI: 10.1121/1.5131643. (In Engl.).

13. Wang Z., Li S., Chen R. [et al.]. Simulation on the dynamic flow and heat and mass transfer of a liquid column induced by the IR laser photothermal effect actuated evaporation in a microchannel // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 113. P. 975–983. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.123. (In Engl.).

14. Xu Q., Chen R., Wang H. [et al.]. IR laser induced evaporation from a microchannel // Chemical Engineering Science. 2015. Vol. 130. P. 31–40. DOI: 10.1016/j.ces.2015.03.011. (In Engl.).

15. Li S., Chen R., Zhu X. [et al.]. Numerical investigation of the convection during the liquid column evaporation in microchannels IR laser heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 101. P. 970–980. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.119. (In Engl.).

16. Lv H.-F., Ma X.-X., Zhang B. [et al.]. Microwave-vacuum drying of round bamboo: A study of the physical properties // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 211. P. 44–51. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.221. (In Engl.).

17. Vongpradubchai S., Rattanadecho P. The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2009. Vol. 48, Issue 5. P. 997–1003. DOI: 10.1016/j.cep.2009.01.008. (In Engl.).

---

**TRUSHLYAKOV Valeriy Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aircraft and Rocket Building Department.

SPIN-code: 2910-2159

AuthorID (RSCI): 9914

AuthorID (SCOPUS): 56454317700

ResearcherID: D-7270-2015

Correspondence address: [vatrushlyakov@yandex.ru](mailto:vatrushlyakov@yandex.ru)

**LESNYAK Ivan Yuryevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Machine Engineering Department.

SPIN-code: 6114-0646

ResearcherID: E-6397-2014

Correspondence address: [lesnyak.ivan@gmail.com](mailto:lesnyak.ivan@gmail.com)

**SEVOYAN Vardan Arturovich**, Graduate Student, Aircraft and Rocket Building Department.

SPIN-code: 2063-4032

ORCID: 0000-0002-9222-6108

ResearcherID: T-6437-2018

Correspondence address: [Vardan.sevoyan@bk.ru](mailto:Vardan.sevoyan@bk.ru)

#### For citations

Trushlyakov V. I., Lesnyak I. Yu., Sevoyan V. A. Creation of experimental base for investigation the effect of laser radiation on intensity of process of evaporation of liquid from porous metal structures // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 88–97. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-88-97.

Received April 23, 2021.

© V. I. Trushlyakov, I. Yu. Lesnyak, V. A. Sevoyan