

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
Исследовательский сектор  
Практика «Испытания»

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

| <i>Компетенция</i>                          | <i>Сложность</i> |  |  |  |
|---|------------------|--|--|--|
| Анализ принципов работы технологий          |                  |  |  |  |
| Моделирование систем и процессов            |                  |  |  |  |
| Постановка и проведение эксперимента        |                  |  |  |  |
| Обработка и представление полученных данных |                  |  |  |  |

**РЕКОМЕНДУЕМЫЙ УРОВЕНЬ ПОДГОТОВКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КЕЙСА:**

| <b>КОМПЕТЕНЦИЯ</b>                                 | <b>РЕКОМЕНДУЕМЫЙ УРОВЕНЬ ПОДГОТОВКИ</b>  |
|--|--|
| <b>Анализ принципов работы технологий</b>          | <p><i>Знать:</i> основные законы школьного курса по термодинамике и оптике, виды энергии и принципы ее преобразования, принципы работы простейших гидравлических систем.</p> <p><i>Уметь:</i> применять на практике основные законы школьного курса по термодинамике и оптике, анализировать технические системы на основе имеющихся принципиальных схем.</p>  |
| <b>Моделирование систем и процессов</b>            | <p><i>Знать:</i> принципы и особенности масштабируемости физического процесса при его воспроизведении в лаборатории, подходы при воспроизведении того или иного физического процесса.</p> <p><i>Уметь:</i> моделировать исследуемый процесс в лабораторном масштабе, оценивать факторы, которыми можно пренебречь при воспроизведении физического процесса в лаборатории, создавать упрощенные стенды для воспроизведения физических процессов.</p>  |
| <b>Постановка и проведение эксперимента</b>        | <p><i>Знать:</i> основные этапы экспериментального исследования, основы конструирования устройств и механизмов, основы техники безопасности при проведении экспериментальных опытов, принципы работы с экспериментальными установками для получения достоверных экспериментальных данных.</p> <p><i>Уметь:</i> разрабатывать и собирать простейшие экспериментальные установки, исходя из предъявляемых к ним требованиям, разрабатывать методику проведения и программу эксперимента, систематически собирать данные в ходе эксперимента по показаниям датчиков и регистрирующих устройств, анализировать работу установки для оценки корректности ее функционирования.</p> |
| <b>Обработка и представление полученных данных</b> | <p><i>Знать:</i> основные расчетные формулы для обработки экспериментальных данных, а также формулы для расчета погрешностей.</p> <p><i>Уметь:</i> анализировать и интерпретировать с физической точки зрения получаемый результат, оценивать погрешности и определять их источник.</p>  |

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

---

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

**Актуальность**

Развитие труднодоступных регионов с суровыми климатическими условиями в наши дни для России является актуальной задачей в связи с освоением Арктики. Российская Арктика сегодня имеет всего три крупных города: Мурманск (~300 тыс. чел.), Норильск (~170 тыс. чел.) и Воркута (~60 тыс. чел.), – а её общая плотность населения находится на уровне ~0,6 чел/км<sup>2</sup>. Однако Россия ставит перед собой масштабную комплексную задачу, включающую в себя улучшение условий жизни в арктических регионах, создание устойчивых самообеспеченных поселений, а также создание масштабной промышленной и экономической инфраструктуры, в частности развитие Северного морского пути [1]. Решение этой задачи неразрывно связано с повышением доступности энергии, в том числе тепловой – для обогрева помещений и организации горячего водоснабжения. Использование ископаемого топлива (природный газ, уголь, мазут) для этой цели может быть крайне дорого в силу низкой транспортной доступности. В то же время, несмотря на сложные климатические условия северных регионов, возможно использование солнечной энергии в качестве вспомогательного источника: в Арктических регионах в течение полярного дня средняя мощность солнечного излучения может колебаться в диапазоне от 300 до 550 Вт/м<sup>2</sup> [2], что сопоставимо с мощностью солнечного излучения в средних широтах России (например, в Москве), где солнечная тепловая энергетика уже не кажется экзотикой. Кроме того, опыт других стран показывает возможность применения солнечной энергии для отопительных нужд в северных регионах [3, 4].

Солнечные коллекторы, используемые для получения тепла из солнечного излучения, обладают одним существенным недостатком: их эффективность кратно падает при повышении температуры нагреваемого теплоносителя, который передает тепло в помещение или нагреваемой для бытовых нужд воде. Этот эффект усугубляется, если коллектор эксплуатируется в холодном климате. Связано это с возрастающими тепловыми потерями, с которыми стараются бороться различными методами. Одним из таких способов является изменение механизма поглощения солнечной энергии. В то время, как стандартная технология основана на нагреве солнцем зачерненной поверхности, от которой тепло далее передается в теплоноситель, в новой технологии солнечное излучение поглощается непосредственно в теплоносителе, расположенном в прозрачном объеме или текущем в прозрачных каналах. Для повышения поглощающих свойств теплоносителя необходимо

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

---

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

растворение микронных или субмикронных частиц, способных хорошо поглощать солнечное излучение. Суспендированные частицы в жидкости при этом имеют большую суммарную площадь контакта с жидкостью, интенсифицируя теплообмен. Данное решение снижает тепловые потери за счет отсутствия перегретых зачерненных поверхностей, обращенных к окружающей среде. Однако на практике реализация новой технологии сбора солнечной энергии (объемное поглощение в теплоносителе) требует подбора как самого типа частиц и способа растворения его в жидкости для получения стабильной суспензии, так и их оптимальной концентрации для обеспечения наилучших поглощающих свойств теплоносителя в прозрачном объеме солнечной установки, имеющем *заданную* геометрию. Дополнительно, учитывая хрупкую экосистему Арктики, требуется создание максимально экологически безопасной тепловой системы. Заметно способствовать этому может использование нетоксичных материалов частиц, например, растворимого кофе [3, 5, 6]. Как показывают недавние исследования, растворимый кофе представляет собой нетоксичную и стабильную суспензию нанометровых частиц, применимую для технологии объемного поглощения энергии. Вопрос ее использования заключается в «настройке» ее оптических свойств, а именно – в выборе оптимальной концентрации, которая позволяет поглотить максимальную долю падающей в прозрачный объем коллектора энергии солнечного излучения, но при этом не делая жидкость сильно непрозрачной, что превратило бы ее в аналог непрозрачной зачерненной поверхности с высокими показателями тепловых потерь.

**Этапы работы над проектом**

- Анализ литературы

Пользуясь доступными Вам литературными источниками, изучите принцип работы солнечных тепловых коллекторов, а также принцип работы коллектора прямого поглощения. Познакомьтесь с наножидкостями и суспензиями на основе кофе.

- Экспериментальная работа

Разработайте лабораторную установку для определения эффективности прямого поглощения световой энергии в жидкости. Под эффективностью поглощения световой энергии следует понимать отношение поглощенной в жидкости доли световой энергии  $Q_T$  (которая затрачивается на нагрев жидкости) к полному количеству энергии светового

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

**Кейс № 1 Объемное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

излучения  $Q_c$ , попавшего на поверхность рабочего объема установки с испытуемой жидкостью в течение времени ее нагрева (1):

$$\eta = \frac{Q_T}{Q_c} = \frac{cm\Delta T}{FIt} \quad (1)$$

где  $\Delta T$ , °C – подогрев образца жидкости массой  $m$ , кг; в течение времени  $t$ , с; обладающей средней удельной теплоемкостью  $c$  Дж/(кг·°C) в диапазоне температур нагрева;  $F$ , м<sup>2</sup> – площадь облучаемой светом поверхности;  $I$ , Вт/м<sup>2</sup> – мощность светового излучения.

Для лучшей воспроизводимости результатов и систематичности проведения экспериментов в качестве источника светового излучения предлагается использовать галогеновую лампу мощностью до 500 Вт. Мощность излучения такой лампы приведена в таблице 1.

*Таблица 1. Мощность излучения галогеновой лампы (2900 К), мощностью 500 Вт, на различном удалении от нее.*

|                         |     |     |     |     |     |      |      |      |      |       |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| $s$ , м                 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 0,1   |
| $I$ , Вт/м <sup>2</sup> | 263 | 328 | 420 | 553 | 764 | 1150 | 1755 | 3097 | 8596 | 14900 |

Для проверки гипотезы о преимуществе объемного поглощения энергии проведите сравнительные тесты:

1) В первой серии тестов определите эффективность поглощения светового излучения в наножидкости на основе растворимого кофе, размещенной в прозрачном объеме, например, плоскодонной колбе объемом 500 мл. Для этого измеряйте скорость нагрева жидкости непрерывно или в определенном интервале температур и соотнесите это с потоком энергии от источника света.

2) Во второй серии тестов воспроизведите поглощение световой энергии стандартным способом – в воде, размещенной в непрозрачном зачерненном объеме. Этим объемом может служить та же колба, но покрытая слоем черной краски или другого материала, хорошо поглощающего световое излучение. В идеальном случае форма и размеры объемов для двух серий измерений должны быть одинаковыми. Для большей достоверности получаемых

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

---

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

результатов проведите опыты при нескольких различных температурах: начиная от комнатной и заканчивая повышенными температурами, например, 80°C.

Наножидкость на основе кофе изготавливается путем заваривания растворимого кофе в кипятке (температура жидкости – выше 95 °С). Количество завариваемого кофе (т.е. его концентрация) является предметом исследования: необходимо определить, при какой концентрации будет достигнута наивысшая эффективность поглощения световой энергии. Рекомендуемый диапазон концентрации кофе – до 5% масс.

Проводя лабораторные опыты, стоит помнить, что световое излучение каждого конкретного источника имеет свой спектр – зависимость мощности излучения от длины волны. При этом реальные вещества имеют спектр поглощения – зависимость доли поглощаемой энергии светового излучения (степени черноты) от длины волны падающего излучения. В качестве одного из заданий участникам необходимо определить, как могут измениться результаты экспериментов при переходе к естественному свету за счет изменения спектра излучения (лампы накаливания, в отличие от Солнца, имеют планковский спектр излучения). Солнечный спектр излучения можно получить в справочных материалах [7]. Говоря простыми словами, участникам, выполняющим проект, необходимо предложить методику пересчета оптимальной концентрации кофе для случая освещения наножидкости солнечным излучением. При этом исходные данные по оптимальной концентрации в данном проекте определяются участниками в опытах с искусственным освещением. Для выполнения этого пункта задания следует обратить внимание на рисунок 1, где показана зависимость поглощения светового излучения кофейной наножидкостью. Она представлена в виде зависимости коэффициента экстинкции,  $k(\lambda)$ , являющегося мерой ослабления светового излучения в слое жидкости толщиной  $l$  (2):

$$k(\lambda) = -\frac{1}{l} \ln \left( \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right) \quad (2)$$

где  $I(\lambda)$  и  $I_0(\lambda)$  – **удельные** мощности падающего и прошедшего через слой жидкости пучка света на длине волны света  $\lambda$ , Вт/(м<sup>2</sup>·нм), соответственно.

Все полученные в работе результаты представьте в виде графиков и таблиц. Рассчитайте погрешности полученных данных.

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

Дополнительно: предложите свой вариант конструкции солнечного коллектора прямого поглощения с кофейной наножидкостью. Сопровождение схемы оценочными расчетами конструкции приветствуется. Оцените оптимальную концентрацию частиц кофе в наножидкости для геометрии прозрачного объема в предлагаемом коллекторе. Какие материалы могут быть использованы вместо растворимого кофе? Обоснуйте ваш ответ.

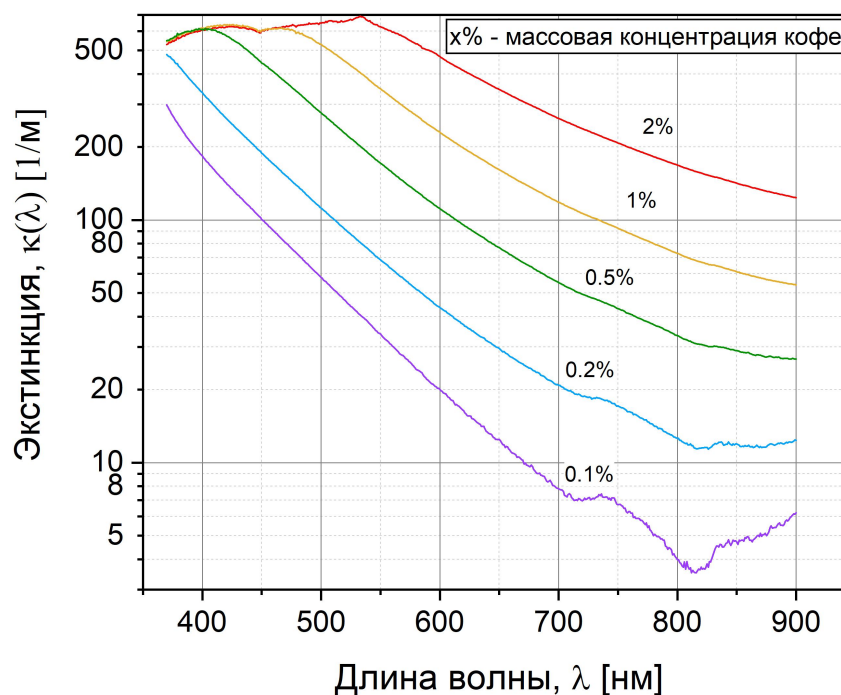


Рисунок 1. Экстинкция растворимого кофе [3]

**Примерный перечень средств и материалов для выполнения задания**

- стеклянные колбы объемом 500 мл;
- черная краска;
- галогенная лампа мощностью до 500 Вт;
- растворимый кофе;
- весы;
- температурные датчики;
- датчики интенсивности светового излучения;
- вода;

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

---

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

- штатив;
- индивидуальные средства защиты: затемняющие очки (наиболее оптимально – сварочные), теплоизолирующие перчатки, халат.

**Требования к представлению решения задания**

Представляемое решение задания должно включать в себя анализ теоретических и экспериментальных исследований по сбору солнечной тепловой энергии, в частности по коллектору прямого поглощения. Помимо литературного обзора участники представляют описание установки, разработанной для проведения опытов, включая её принципиальную схему. Приводится описание методики выполнения опытов, а также расчётные уравнения, использовавшиеся при обработке и анализе данных, включая расчёт погрешностей результатов измерений. Также участники приводят необходимые графики и таблицы, содержащие основные результаты экспериментов. Описание методики проведения экспериментов должно обладать такой степенью подробности, которая позволит провести независимое воспроизведение опытов и их результатов.

Представляемое решение должно быть оформлено в виде машинописного текста. Рекомендуется использование шрифта Times New Roman 12-го кегля с междустрочным интервалом, равным 1,5 высоты строки. Отступы от левого края – 25 мм, отступы от правого, нижнего и верхнего края – 20 мм. Объём решения – не более 15 страниц формата А4, включая рисунки и таблицы, без учёта приложения.

**Структура и содержание работы**

Документация в обязательном порядке должна включать в себя:

1. Титульный лист (школа, авторы, название кейса, название команды, руководитель).
2. Описание команды, распределение ролей, функций и обязанностей каждого участника команды.
3. Теоретическое введение. В разделе «Введение» обосновывается актуальность исследования, формулируются цель и задачи работы, а также предоставляется краткий литературный обзор темы исследования.

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

---

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

4. Методику проведения исследования. В разделе «Методика исследования» описывается порядок выполнения экспериментов, экспериментальная установка, приводится ее схема, указываются расчётные формулы, использованные для обработки полученных данных, а также приводится описание методики оценки погрешностей экспериментальных результатов.
5. Результаты проведённого исследования. В разделе «Результаты» необходимо представить полученные данные, а также результаты их обработки в виде таблиц и/или графиков, привести интерпретацию и физическое объяснение результатов. Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и подписаны.
6. Разработанные 3D-модели в форматах .obj, .stl или .step, скриншоты разработанных 3D-моделей (как системы в целом, так и отдельных ее частей (при наличии)). 3D-модели должны находиться в репозитории проекта в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.)
7. Описание схемы разработанной установки в виде изображений общей схемы установки, электрической принципиальной схемы, монтажной схемы, оптической схемы (если имеется) и т.д.
8. В случае разработки программного обеспечения должен быть приведён алгоритм его работы в виде блок-схем.
9. Код разработанного программного обеспечения должен быть представлен в виде ссылки на репозиторий проекта с кодом в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Любые архивы с загруженными исходными кодам (.zip, .rar и т.п.) загружать в другие хранилища данных запрещается.
10. Фотографии разработанной установки и её составных частей.
11. Видеоролик, демонстрирующий выполнение экспериментальных измерений в соответствии с требованиями кейса. На видео необходимо продемонстрировать прохождение каждого эксперимента, описанного в задании, или отдельных его частей. Видео с проведённым экспериментом должно однозначно подтверждать авторство



**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

---

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

участников (во время записи ролика необходимо чётко произнести название команды, ФИО участников, номер школы, ФИО руководителя). Видеоролик располагается на стороннем видеохостинге (ВКонтакте, Rutube и др.), ссылка на видеоролик располагается в репозитории в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Весь эксперимент – от подготовки к работе до завершения последнего этапа – должен быть записан на видео одним дублем без склейки и монтажа. В течение всего видео в кадре должны быть разработанная командой установка и, как минимум, один из участников команды, выполняющий все операции с ней. Вход и выход участников, передача инструмента, деталей и других вещей из кадра недопустимо. Допускается использование второй камеры для более детализированной демонстрации ключевых моментов. Видео должно быть со звуком, на видео должны быть отчётливо слышны подаваемые голосовые команды и действия участников. На видеозаписи должно быть хорошо различимы все элементы, влияющие на оценивание результативности. В случае, если эксперты не смогут по видеозаписи однозначно понять результат выполнения задания, принимается решение не в пользу участника.

12. Заключение. Раздел «Заключение» включает в себя краткое изложение результатов работы, подведение итогов исследования, обсуждение его практической и теоретической значимости. Также могут быть предложены дополнительные направления исследований.
13. Список литературных источников. В этом разделе приводится список использованных источников, статей, книг и другой литературы, на которые ссылаются в исследовании. Кроме того, работа может содержать приложения с иллюстративным материалом (рисунки, схемы, таблицы, фотографии и т. п.). На каждое приложение должна быть дана ссылка в тексте работы.

**Список рекомендуемой литературы**

1. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику / А. С. Дмитриев. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 790 с.: ил. — (Нанотехнологии);

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ  
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**  
**Исследовательский сектор**  
**Практика «Испытания»**

---

**Кейс № 1 Объёмное поглощение солнечного излучения для эффективной  
генерации тепла**

2. Даффи Д. Основы солнечной теплоэнергетики: [учебно-справочное руководство] / Дж. Даффи, У. Бекман ; пер. с англ. О. С. Попеля [и др.]. - Долгопрудный: Интеллект, 2013. - 885 с.: рис., табл.

**Список источников:**

1. Государственная программа Российской Федерации "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации"  
<https://minvr.gov.ru/activity/gosprogrammy/sotsialno-ekonomicheskoe-razvitie-arkticheskoy-zony/>

2. Братков В.В., Воронин А.П. Метеорология и климатология: Уч. пос. / МИИГАиК: Изд-во МИИГАиК, 2015, 209 с.

3. P. G. Struchalin, Y. Zhao, B. V. Balakin, Field study of a direct absorption solar collector with eco-friendly nanofluid, Applied Thermal Engineering, vol. 243, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122652>

4. Sweden's largest concentrating solar park supply heat to district heating. <https://www.absolicon.com/swedens-largest-concentrating-solar-park-supply-heat-to-district-heating/>

5. F.A. Essa, Ammar H. Elsheikh, Almoataz A. Algazzar, Ravishankar Sathyamurthy, Mohamed Kamal Ahmed Ali, Mohamed Abd Elaziz, K.H. Salman. Eco-friendly coffee-based colloid for performance augmentation of solar stills, Process Safety and Environmental Protection, Volume 136, 2020, Pages 259-267.

6. Boris V. Balakin, Pavel G. Struchalin. Eco-friendly and low-cost nanofluid for direct absorption solar collectors, Materials Letters, Volume 330, 2023, 133323.

7. PVE education portal. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>