

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Технологии солнечного опреснения приобрели заметную популярность в последние десятилетия. Они особенно привлекательны для засушливых регионов южных стран, поскольку позволяют получать пресную воду без значительных денежных и материальных затрат. Последнее особенно актуально для небогатых и развивающихся стран.

Одним из способов реализации солнечного опреснения является использование т.н. "солнечных опреснителей" (рисунок 1). Их принцип работы сводится к тому, что морская вода, налитая тонким слоем в теплоизолированный зачернённый поддон, начинает нагреваться и испаряться. Нагрев воды происходит за счёт теплообмена с зачерненным поддоном, который поглощает поступающее солнечное излучение. Утечка образующихся водяных паров предотвращается тем, что поддон накрыт прозрачной крышкой, имеющей особую форму. Пары, контактируя с более холодной, чем поддон, крышкой, конденсируются за счёт отвода тепла в окружающую среду, а её особая форма позволяет каплям стекать в специальный желоб-приёмник по периметру поддона, откуда дальше конденсат самотёком поступает в бак на хранение.

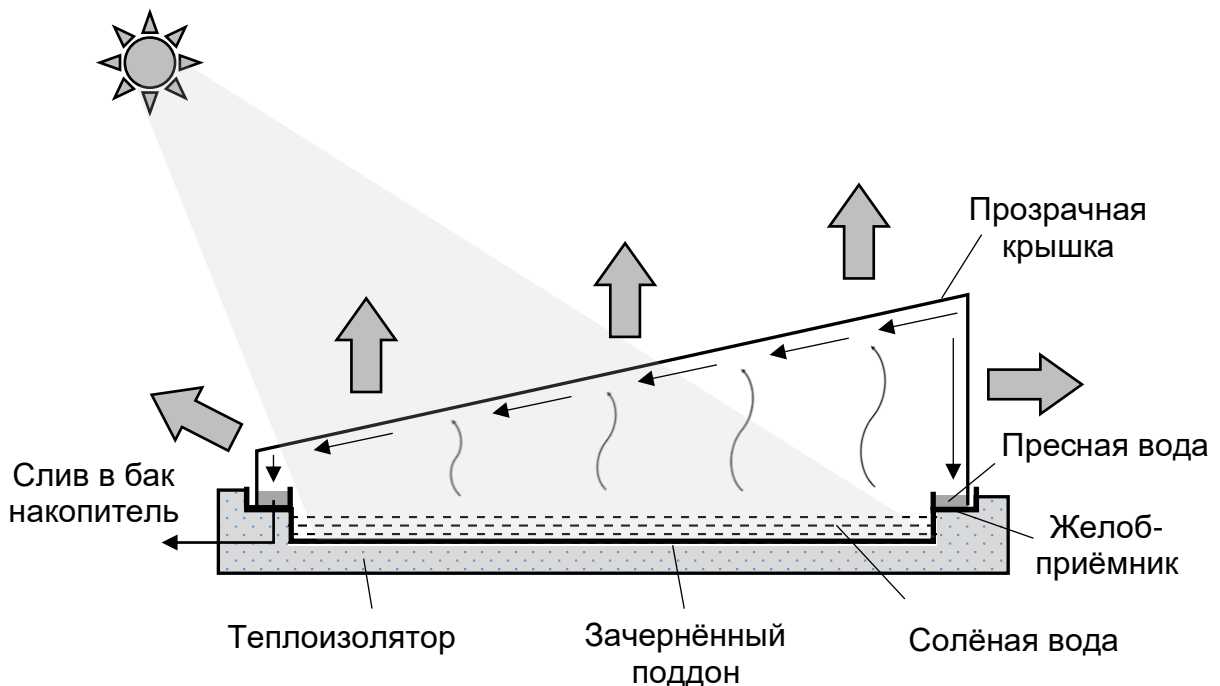


Рисунок 1 – Схема солнечного опреснителя

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

При создании солнечной опреснительной станции нужной производительности возможно объединение в одну систему нескольких отдельных солнечных опреснителей. В этом случае требуется проведение теплофизического расчёта, который позволит понять какая доля солнечной энергии будет действительно затрачена на испарение воды, а какая - будет утеряна в окружающую среду. Теплофизический расчёт позволяет установить количество опреснителей, требуемых для объединения в систему для получения нужной производительности по пресной воде. Отношение энергии солнечного излучения, затраченной на испарение жидкости в единицу времени, к поступающей энергии солнечного излучения на поверхность опреснителя в единицу времени определяет термическую эффективность η опреснителя (1):

$$\eta = \frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{изл}}} = \frac{r m_{\text{п}}}{S_{\text{п}} I \tau} \quad (1)$$

В уравнении (1) $Q_{\text{исп}}$ – энергия, затраченная на испарение жидкости, Дж; $Q_{\text{изл}}$ – энергия светового излучения, поступившая в опреснитель, Дж; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; $m_{\text{п}}$ – масса водяных паров, кг, образовавшихся за время τ , с; $S_{\text{п}}$ – площадь поддона, м²; I – интенсивность светового излучения, Вт/м².

Термическая эффективность – важный технический параметр, позволяющий рассчитывать различные по масштабу тепловые установки (в данном случае – опреснительную), находящиеся в разных условиях эксплуатации. Строго говоря, термическая эффективность может зависеть от множества параметров, но для солнечных тепловых установок наиболее значимыми являются перепад температуры между окружающей средой и рабочим телом в установке, а также интенсивность солнечного излучения.

Как следует из описания принципа работы опреснителя, в рабочем режиме он находится при повышенных (относительно окружающей среды) температурах. Энергия солнечного излучения, поступающая в опреснитель, непрерывно расходуется на испарение жидкости, но и частично теряется в окружающую среду в виде инфракрасного излучения от нагретого поддона и тепловых потерь через слой теплоизолятора. Стоит обратить внимание, что отвод тепла от водяных паров через прозрачную крышку к окружающей среде в данном случае тепловыми потерями не считается, так как процесс испарения уже был совершён за

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

счёт использования солнечной энергии. Образовавшиеся водяные пары неизбежно превратятся в пресную воду.

Определить мощность тепловых потерь $N_{\text{конв}}$, Вт, с торцевых и донных сторон опреснителя можно, используя уравнение Ньютона-Рихмана (2):

$$N_{\text{тепл}} = kS(T_{\text{ж}} - T_0) \quad (2)$$

k - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); S – площадь внешней поверхности теплоизолятора поддона, м²; $T_{\text{ж}}$ и T_0 - температура внешней жидкости и окружающего воздуха, соответственно, К. Коэффициент теплопередачи зависит от скорости ветра вокруг опреснителя: увеличение скорости ветра приведет к росту коэффициента передачи. Ориентировочное процентное увеличение коэффициента теплопередачи k для солнечного опреснителя приведено на рисунке 2.

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

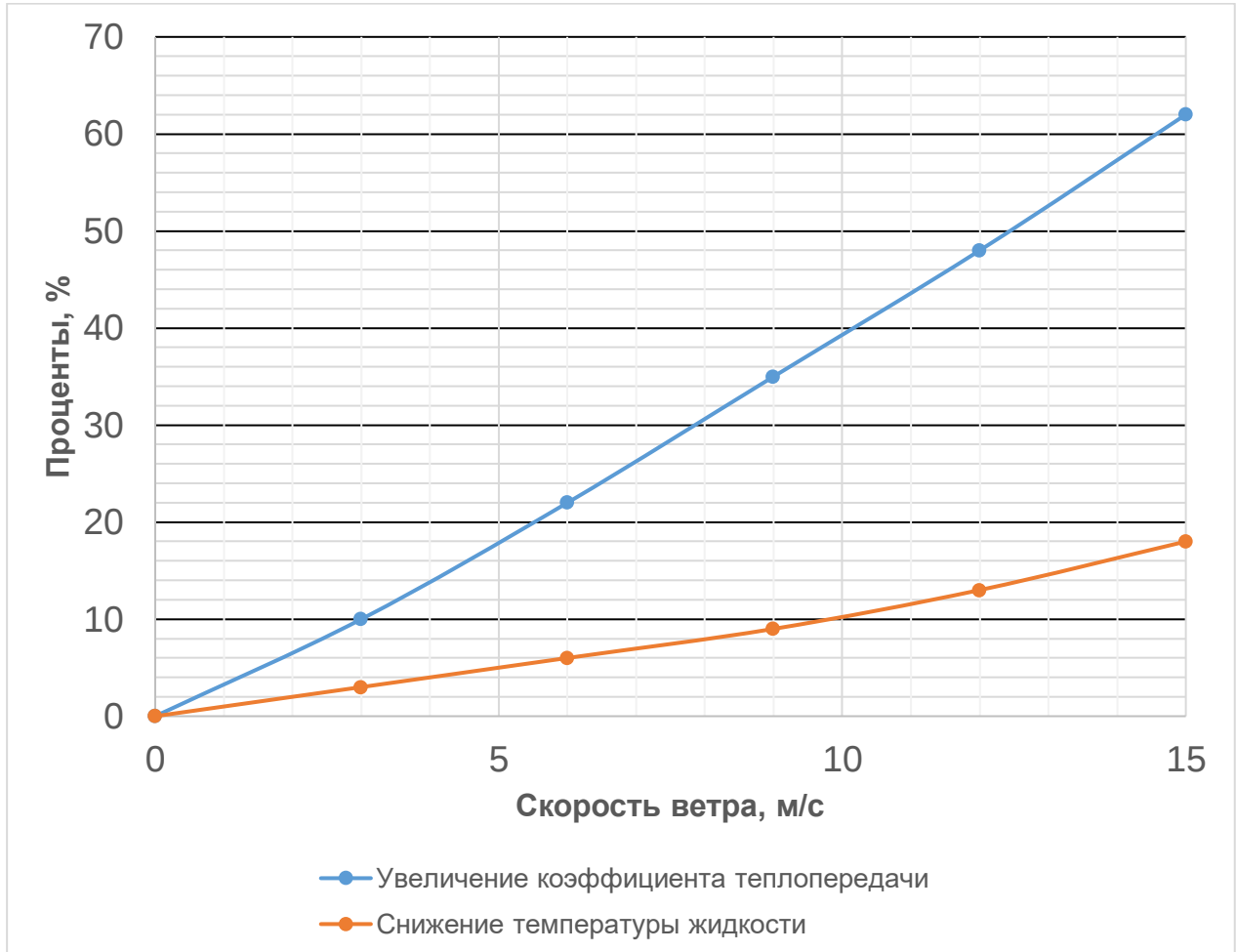


Рисунок 2 – Процентное увеличение коэффициента теплопередачи через боковые и донную поверхности солнечного опреснителя от скорости ветра и ориентировочное процентное снижение достигаемой стационарной температуры жидкости в опреснителе

Тепловые потери излучением определяет закон Стефана-Больцмана. При расчете тепловых потерь от нагретой поверхности в полупространство (как в случае нагретого поддона) этот закон записывается в виде (3):

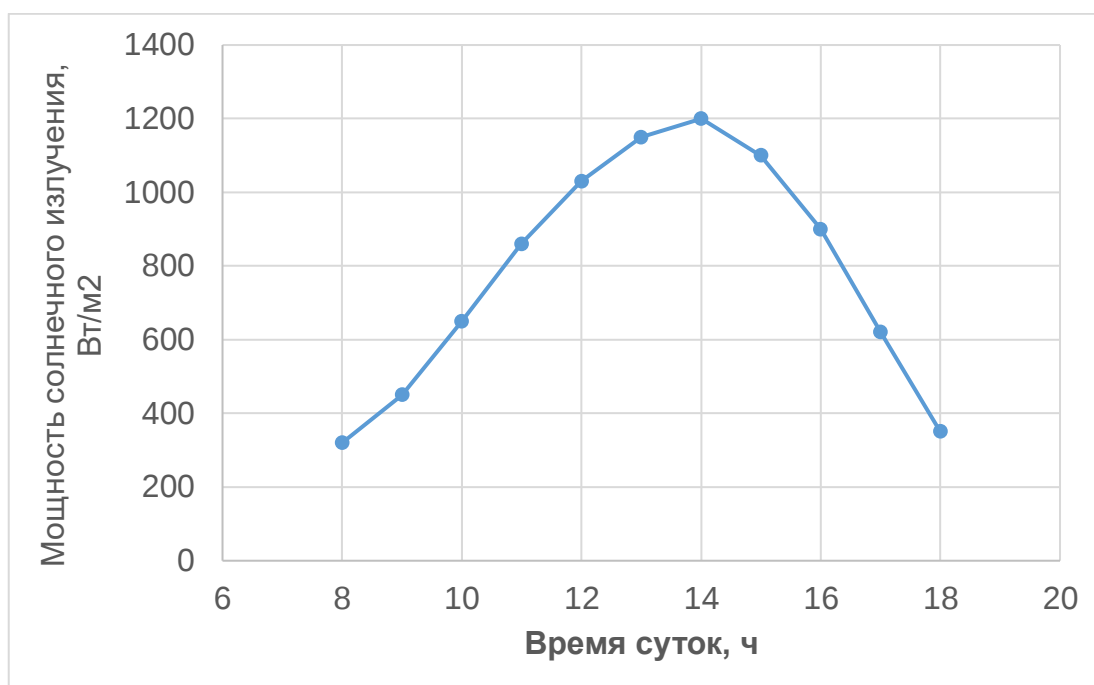
$$N_{\text{изл } 2\pi} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon S_{\text{п}} (T_{\text{ж}}^4 - T_{\text{с}}^4) \quad (3)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень излучающей/поглощающей способности поверхности; $T_{\text{с}}$ – температура окружающей

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

среды/тел, к которым обращена поверхность. Численный коэффициент $1/2$ в выражении (3) учитывает, что изучение осуществляется в полупространство. Степень излучающей/поглощающей способности поверхности можно определить экспериментально. Например, при определении ϵ дна поддона можно воспроизвести нагрев небольшого объёма аналогичной жидкости, находящейся в контакте с аналогичным материалом и показателем ϵ . Направленный пучок света известной мощности в начальном этапе нагрева жидкости сообщает ей энергию, которая в большей степени затрачивается на её нагрев. Тепловые потери сведены к минимуму, так как перепад температуры незначителен.

В настоящем задании Вам необходимо определить минимальную полезную площадь солнечных опреснителей, чтобы образованная ими система могла бы обеспечить суточную потребность в поливочной воде плантации картофеля (100 м^2), равную $m_p = 6 \text{ л/сут.}$ Дневное изменение температуры воздуха, скорости ветра и мощности солнечного излучения показаны на рисунке 3. Поскольку расчёт оценочный, считать, что время выхода опреснителя на стационарный режим работы сильно короче, чем длительность светового дня.



**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

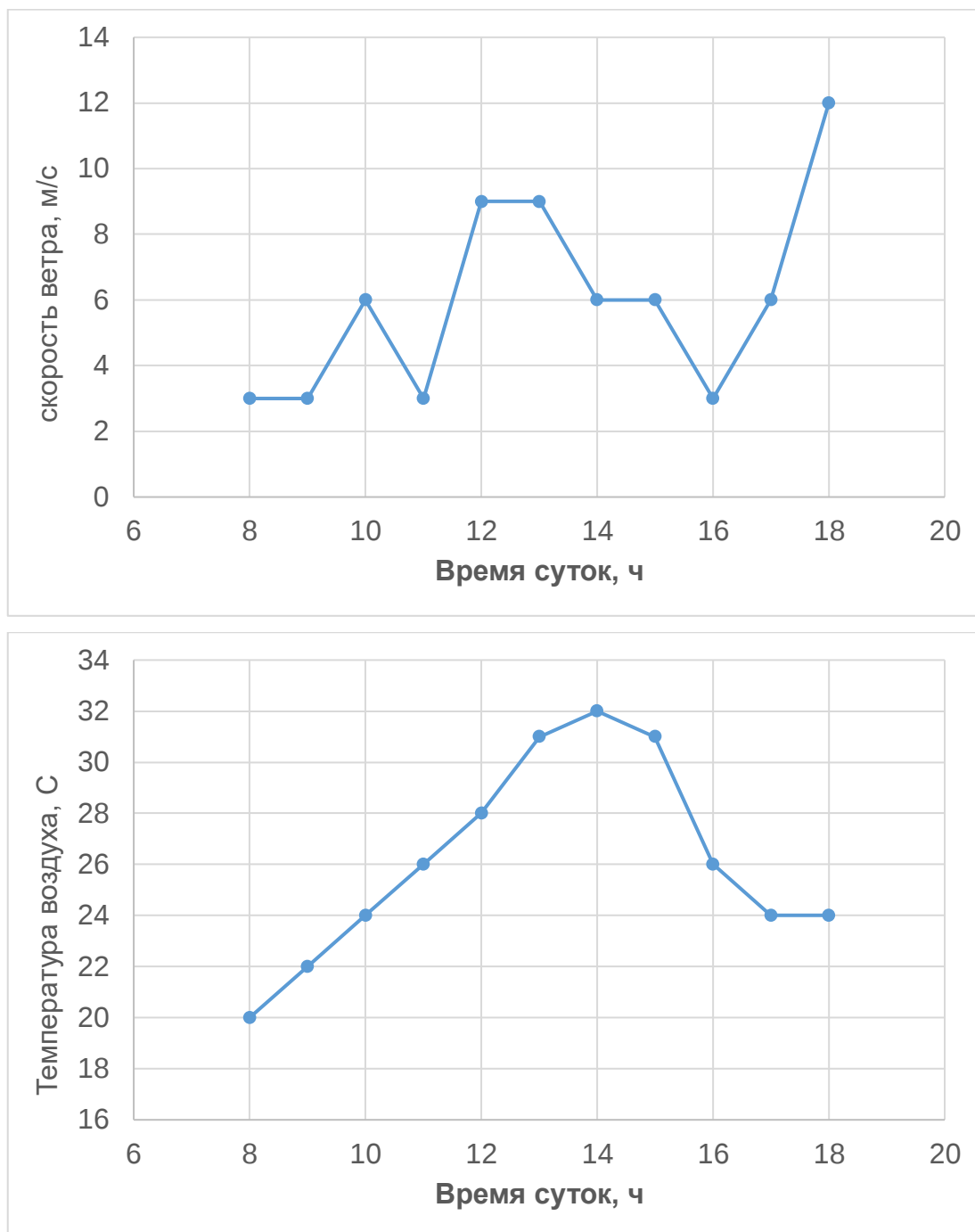


Рисунок 3 – Мощность солнечного излучения, скорость ветра и температура окружающего воздуха в задании

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

Время, ч	Мощность солнечного излучения, Вт/м²	Скорость ветра, м/с	Температура окружающего воздуха, °С
8	320	3	20
9	450	3	22
10	650	6	24
11	860	3	26
12	1030	9	28
13	1150	9	31
14	1200	6	32
15	1100	6	31
16	900	3	26
17	620	6	24
18	350	12	24

2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Состав оборудования для проведения эксперимента:

1. Лампа накаливания 40 Вт с цоколем и проводом подключения – 1 шт.
2. Зачернённая ёмкость для солёной воды – 1 шт.
3. Теплоизолятор для ёмкости – 1 пог. м.
4. Крышка для ёмкости – 1 шт.
5. Ёмкость для смешивания воды – 1 шт.
6. Комплект измерительных инструментов – 1 шт.
7. Термометр электронный – 1 шт.
8. Секундомер (на ПК) – 1 шт.
9. Фольга – 1 шт.
10. Малярный скотч – 1 шт.
11. Ножницы – 1 шт.
12. Штатив для лампы – 1 шт.

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

13. Весы лабораторные – 1 шт.

14. Персональный компьютер – 1 шт.

Созданный прототип солнечного опреснителя расположен в выделенных изолированных зонах и доступен для осмотра командами. Во время выполнения задания он находится в стационарном режиме работы, производя пресную воду за счёт поглощения энергии светового излучения ламп. С его помощью Вы сможете определить недостающие для расчёта геометрические и рабочие параметры устройства. При оценке тепловых потерь, считайте, что движение воздуха в помещении пренебрежимо слабо, а коэффициент теплопередачи от опреснителя к окружающей среде составляет $0,6 \text{ (Вт/м}^2\cdot\text{К)}$.

1) Опишите принципы работы солнечного опреснителя, основные физические процессы наблюдаемые в процессе работы установки. Проанализируйте, какие факторы, оказывают влияние на его производительность, эффективность.

2) Определите, какие параметры и характеристики потребуется измерить на прототипе солнечного опреснителя для выполнения теплофизического расчёта, описанного в задаче.

3) Определите, какой набор измерительных приборов потребуется для проведения эксперимента.

4) Проведите требуемые измерения на прототипе солнечного опреснителя.

В связи с ограниченным числом опреснителей, время работы команды на установке ограничено 10 минутами. После завершения 10 минут установка освобождается для измерений другой команды. После прохождения всех команд через установку вы можете повторно выполнить измерения на прототипе опреснителя

Поглощающие свойства материала поддона предлагается определить в отдельном тесте, где меньший по размерам зачернённый пластиковый объем, содержащий солёную воду, нагревается лампой, мощностью $N_{\text{л}} = 40 \text{ Вт}$. Если с помощью отражающего экрана (фольга) сформирован луч, направленный на небольшой модельный объем с жидкостью, то возможно оценить степень черноты поддона, решив уравнение теплового баланса: поступившая энергия излучения от лампы в модельный объем затрачена на нагрев воды известной массы. Рассчитать поступающую мощность энергии от лампы к объему $N_{\text{о-л}}$ можно через

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

упрощённую запись закона Стефана-Больцмана с поправкой на расстояние R от лампы до дна объёма и радиус луча r :

$$N_{л-0} = \frac{r^2}{4R^2} N_l \varepsilon$$

Поскольку модельный объем теплоизолирован, то при малых нагревах жидкости (порядка 0,3-0,4 К) относительно окружающей среды тепловыми потерями можно пренебречь. При расчёте тепловых потерь излучением учтите, что опреснитель в лаборатории окружен предметами с температурой окружающей среды, а реальный опреснитель на улице направлен в небо.

5) Подготовьте полное текстовое описание планируемого модельного эксперимента по определению степени черноты поддона. Опишите планируемую методику, а также схему вашей экспериментальной установки.

6) Проведите необходимые измерения с помощью имеющегося у вас оборудования.

Обратите внимание, что лампа во время работы имеет высокую температуру. Касаться лампы строго запрещено. Любые манипуляции с лампой допустимы только при её отключении и полном остывании.

7) Опишите теоретическую модель вашего эксперимента, приведите необходимые формулы и расчёты.

3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
--

Для успешной защиты решения кейса команде потребуется к моменту окончания времени работы иметь на столе следующие материалы и возможности демонстрации:

1) Иметь собранную установку и уметь качественно описывать явления, происходящие в ней.

2) Таблицы прямых измерений, а также другие параметры, которые участники посчитали необходимыми. Для проведённых измерений необходима оценка погрешностей.

3) Графические результаты, если участники посчитали их необходимыми на ранних этапах работы.

4) Список выводов о проделанной работе, а также об оценке эффективности предложенного подхода в проводимом исследовании.

**МОСКОВСКАЯ ПРЕДПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ**
Заключительный этап
Исследовательский сектор. Испытания.
Солнечный опреснитель
ФИНАЛЬНЫЙ КОМАНДНЫЙ КЕЙС

5) Список предложений по улучшению качества исследования.

4. ЗАЩИТА РЕШЕНИЯ КЕЙСА

Для демонстрации ваших результатов, составьте отчёт в формате .docx, .doc или .pdf.
Он должен включать в себя:

- 1) Способ нахождения площади солнечной опреснительной станции требуемой производительности: перечислены физические законы и их взаимосвязь, а также указание для чего должны использоваться данные с опреснителя, находящегося в помещении
- 2) Обоснование метода измерений и теоретический вывод всех используемых соотношений.
- 3) Все выписанные в разделе 3 пункты
- 4) Выводы об эффективности метода и оценку применимости метода опреснения жидкости с помощью солнечного излучения.

ЖЕЛАЕМ УСПЕХОВ В РАБОТЕ!