

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ

АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ, БИОСФЕРЫ:

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ



МОСКВА – 2013

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
*НА УЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ*

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ЭНЕРГОРЕСУРСЫ
АТМОСФЕРЫ,
ГИДРОСФЕРЫ,
БИОСФЕРЫ:
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Под редакцией А. А. Соловьева

Москва
«Университетская книга»
2013

УДК 620 ББК 31.15

В64

*Печатается по решению
Ученого совета географического факультета
МГУ имени М. В. Ломоносова*

Авторы-составители:

*Андреев Т. И., Берёзкин М. Ю., Зайцев С. И.,
Киселева С. В., Коробкова Т. П., Нефедова Л. В., Рафикова Ю. Ю.,
Соловьев А. А., Чернова Н. И.*

Рецензенты:

чл.-корр. РАН, профессор, доктор географических наук *С. А. Добролюбов*
профессор, доктор технических наук *В. В. Бушуев*

В64 Возобновляемые энергоресурсы атмосферы, гидросферы, биосферы:

лабораторный практикум / Под ред. А. А. Соловьева. — М.: «Университетская книга»,
2013. — 156 с: ил.

ISBN 978-5-91304-338-2

Данное руководство содержит описание лабораторных работ практикума для студентов географического факультета МГУ и слушателей программы дополнительного образования, специализирующихся в области возобновляемой энергетики и рационального использования природных ресурсов. Ряд задач посвящен изучению явлений геофизической гидродинамики и предназначен для студентов-океанологов. Каждый раздел практикума включает в себя сведения об изучаемом явлении, описание экспериментальной установки измерительных приборов или применяемых методов, порядок проведения практических работ и обработки полученных данных, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Учебное пособие будет полезно также для студентов и преподавателей, специализирующихся в смежных областях.

УДК 620

ББК 31.15

© Коллектив авторов-составителей,
2013 © Географический факультет
МГУ имени М. В. Ломоносова, 2013

ISBN 978-5-91304-338-2

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Ресурсы возобновляемых источников энергии территории.....	5
2. Киселева С.В. Картографирование ресурсов солнечной и ветровой энергии	14
3. Киселева С.В. Оценка технического потенциала энергии ветра и солнца для регионов России	25
4. Рафикова Ю.Ю., Киселева С.В. Принципы работы с базами данных ГИС «ВИЭ России»	35
5. Андреев Т.И., Рафикова Ю.Ю. Оценка и картографирование ресурсов биомассы для регионов России	38
6. Нефедова Л.В. Районирование территорий по суммарному потенциалу возобновляемых энергоресурсов	42
7. Берёзкин М.Ю. География возобновляемых энергоресурсов мира ...	48
8. Соловьев А.А. Моделирование циклонических вихрей	54
9. Соловьев А.А. Энергетика солнечного ветра.....	62
10. Соловьев А.А. Энергия гидравлического прыжка	81
11. Зайцев С.И., Киселева С.В. Формирование циркуляции в замкнутой акватории при неравномерном профиле ветра над водной поверхностью	89
12. Соловьев А.А. Изучение термобарических течений	101
13. Зайцев С.И. Ламинарный и турбулентный режимы течения жидкостей	109
14. Чернова Н.И. Общая характеристика микроводорослей и методы их исследования	117
15. Чернова Н.И. Методы культивирования микроводорослей; практическое выращивание микроводорослей открытым способом ...	126
16. Чернова Н.И. Методы культивирования микроводорослей для энергетических целей: выращивание микроводорослей в условиях физиологического стресса	131
17. Коробкова Т.П. Метод определения нейтральных липидов при первичном скрининге липидообразующих микроводорослей.....	147

ПРЕДИСЛОВИЕ

Помимо курсов лекций по основным разделам гидрометеорологических и экономико-географических дисциплин, семинаров и полевых практик, на географическом факультете проводятся занятия в лабораторных практикумах. Работа на экспериментальных установках чрезвычайно полезна для студентов. Выполнение упражнений и задач в лабораториях дает возможность не только закрепить теоретические знания, но и познакомиться с новыми методами и подходами в научных исследованиях. Лабораторный практикум показывает, что экспериментальная установка, на которой создается модель природного процесса, может существенно дополнить такие методы исследований, как натурные наблюдения и компьютерные расчеты.

Практикум был разработан силами сотрудников научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова и в определенной степени основан на результатах научных исследований лаборатории. Для выполнения задач были созданы оригинальные учебно-научные экспериментальные установки.

Задачи практикума можно объединить в несколько разделов:

- Оценка и картографическое представление ресурсной базы возобновляемой энергетики (ресурсы солнечной, ветровой и биоэнергетики);
- Изучение методов культивирования и анализа нетрадиционных видов сырья для биоэнергетики (микроводорослей);
- Моделирование динамических процессов в атмосфере и способов их использования для получения энергии;
- Лабораторное моделирование гидродинамических процессов в океане и пресноводных водоемах.

Авторы признательны рецензентам: члену корреспонденту РАН, профессору С.А.Добролюбову и профессору В.В.Бушуеву за высказанные замечания, которые были учтены при редактировании и подготовке рукописи к печати.

Лабораторная работа №1
РЕСУРСЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
ТЕРРИТОРИИ

Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю.

Цель работы: Оценки ресурсов солнечной и ветровой энергии территории.

Задача работы: Ознакомиться со структурой и номенклатурой данных, позволяющих оценить ресурсы солнечной и ветровой энергии, представленные в климатических справочниках, открытых Интернет-архивах и специализированных спутниковых базах данных. Провести сравнительный анализ данных.

Принадлежности: персональный компьютер с доступом к сети Интернет, ПО Microsoft Excell, Научно-прикладной справочник по климату СССР, серия 1, серия 3.

Введение в проблему

Развитие возобновляемой энергетики (ВЭ) предполагает решение, как фундаментальных научных проблем, так и прикладных задач. К таковым относится, в частности, создание адекватных методов расчета доступных потоков солнечной и ветровой энергии. Исследования в этом направлении в течение длительного времени основывались в основном на данных наземных метеорологических станций. Результаты обработки многолетних данных метеостанции опубликованы в виде многотомных справочных изданий [1,2] В разные годы были изданы также климатические справочники, содержащие результаты метеорологических измерений за отдельные годы для некоторых областей СССР. Эти издания представляют большую ценность для решения конкретных задач по определению доступных для утилизации возобновляемых солнечных и ветровых энергоресурсов. Вместе с этим необходимо отметить, что процедура проведения измерений на метеостанциях не ориентирована и во многом не удовлетворяет потребностям возобновляемой энергетики.

Переход к современным методам регистрации метеорологических данных с использованием машиночитаемых носителей привел к необходимости создания

баз данных (БД) климатологической и, в частности, актинометрической информации. К настоящему времени создано несколько тематических баз данных. Они различаются по источникам информации (наземные измерения или спутниковые наблюдения); периодам сбора данных (от 1 до 30 лет); представлением характеристик солнечной радиации и ветра (получасовые, часовые, месячные, годовые значения); возможностям пространственной интерполяции. Результаты актинометрических наблюдений, получаемых на российских и зарубежных метеостанциях, аккумулируются в мировом центре радиационных данных (МЦРД) при главной геофизической обсерватории им. А.Е. Воейкова. Сюда поступают результаты актинометрических наблюдений 500 наземных актинометрических станций из 30 стран. Данные о составляющих радиационного баланса после обработки и архивации издаются. Открытый доступ к данным предоставляется на сайте МЦРД (<http://wrdc.mgo.rssi.ru/>). Характеристики скорости ветра измеряются на метеорологических станциях, сеть которых на территории России гораздо обширнее актинометрических. Некоторые результаты измерений представлены в интерактивных базах данных (таблица 1).

Важно отметить, что наземные метеоданные часто не обеспечивают полную информацию необходимую для расчетов и моделирования работы установок на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Особенно это существенно для оценок потенциала солнечной энергии. В настоящее время число российских метеостанций, ведущих регулярные измерения интенсивности солнечной радиации¹ – менее 130 (рисунок 1), причем их распределение по территории неравномерно. В результате среднее расстояние между метеостанциями в расчете на площадь территории России составляет около 500 км. В виду неравномерной плотности их размещения среднее расстояние между станциями в азиатской части России достигает 1000 км. В то же время, по результатам исследований ГГО им. А.И. Воейкова, данные измерений с приемлемой погрешностью могут экстраполироваться на расстояние не более 130 км от метеостанции. Ясно, что для получения надежных данных о посту-

¹ Далее в тексте термин «солнечная радиация» будет употребляться наряду с термином «солнечная энергия» и оба они имеют смысл «энергия солнечного излучения».

плении энергии солнечного излучения для большей части территории страны имеющаяся в настоящее время сеть российских метеостанций явно недостаточна.

Таблица 1 – Ресурсы метеорологической информации.

Ресурс	Сайт	Скорость ветра	Направление ветра	T°C	Влажность воздуха
ВНИИГМИ-МЦД	www.meteo.ru	+	+	+	+
Метеоцентр	www.meteocenter.net	+	+	+	+
Сервер "Погода России"	www.meteo.infospace.ru	+	+	+	+
Погода и климат	www.pogoda.ru.net	+	+	+	+
Расписание погоды РП5	www.rp5.ru	+	+	+	+
Mundomanz	www.mundomanz.com	+	+	+	+
World Weather	www.tutiempo.net	+	-	+	+
National Climatic Data Center	www.ncdc.noaa.gov	+	-	+	-

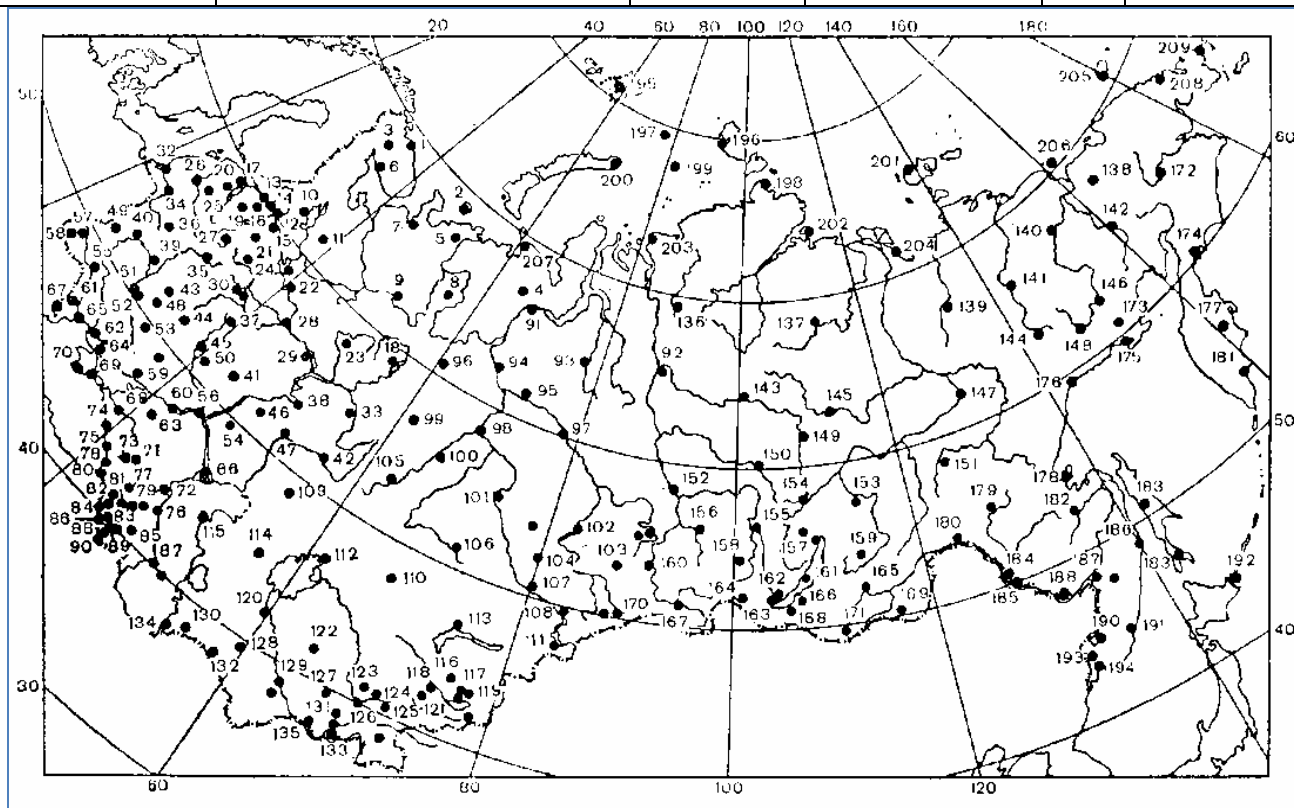


Рисунок 1 – Пункты актинометрических наблюдений бывшего СССР

Вместе с тем метеорологические данные с точки зрения ветроэнергетики обладают рядом несомненных достоинств. Это – длительность рядов наблюдений и более частое покрытие крупных территориальных образований сетью метеорологических станций.

В России регулярная сеть метеостанций существовала уже к началу XX века; в дальнейшем она пополнялась различной прецизионной анемометрической измерительной аппаратурой. В настоящее время на российских метеостанциях широко используются современные чашечные анемометры М-92 и анеморумбометры М-63М - 1 и М-63М-1М с выводом массивов данных измерений на компьютерные системы. Датчики анеморумбометров и флюгеров устанавливаются на мачтах, на высоте 10 – 12 м от поверхности земли в северной части площадки. Одновременно характеристики ветра определяются приборами визуального наблюдения, например, по флюгеру Вильда с легкой и тяжелой доской. Обзор современной методики измерений скорости ветра дан в «Атласе ветров России» [3].

Наблюдения за временной динамикой климатических характеристик производятся в единые синхронные сроки 8 раз в сутки в 0,3,6,9,12,15,18, 21 час московского зимнего времени. Под сроком понимается 10-минутный интервал времени, который заканчивается в указанный час. В число измеряемых характеристик ветра входят: средняя скорость ветра в срок; среднее направление ветра в срок; максимальная скорость ветра в срок; максимальная скорость ветра между сроками (максимальный порыв за 3 ч.) Средняя и максимальная скорости ветра за 10-минутный интервал измеряются с точностью 0, 5 м/с.

Однако, оценить энергетические характеристики ветра по этим данным с необходимой достоверностью в большинстве случаев невозможно. Выделяются следующие неблагоприятные факторы:

- непостоянство высоты флюгера (для различных метеостанций она изменяется от 5 до 40 метров);
- затенённость флюгера деревьями, домами, возвышенностями и т.п.

Для преодоления недостатков наземных метеорологических и актинометрических измерений в настоящее время все шире используются дистанционные (спутниковые) методы и математическое моделирование, что может обеспечить

более детальный массив исходных данных при оценках ресурсов ветровой и солнечной энергии. Большие возможности открываются в связи с разработкой и предоставлением в открытом доступе базы данных космического агентства США NASA SSE (NASA Surface meteorology and Solar Energy) [4]. БД NASA оперирует результатами спутниковых и наземных измерений за период 01.07.1983– 30.06.2005. На основе этих данных с использованием различных моделей атмосферы рассчитываются значения месячных сумм солнечной радиации, падающей на поверхности ориентированные различным образом, а также другие актинометрические и метеорологические характеристики. Учитываются особенности климатических зон земного шара, в том числе характер отражения излучения от земной поверхности (альбедо), состояние облачности, загрязнение атмосферы аэрозолями и т.д. Рассчитанные значения сумм солнечной радиации интерполированы на сетку $1^\circ \times 1^\circ$ по всему земному шару (измерения и расчеты выполнялись для сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$). Массив данных структурирован по возможным потребителям (фотоэлектрические панели и солнечные коллекторы, солнечные кухни, системы с аккумуляторами энергии и тепла).

Характеристики скорости ветра, приведенные в этой БД, являются результатами расчетов на моделях общей циркуляции атмосферы (программа GEOS-5). Расчеты проводятся для двумерной системы, содержащей 72 слоя по вертикали, которые охватывают тропосферу и стратосферу Земли. Скорость ветра на малых высотах (10, 50, 100 м) получают на основе степенных зависимостей скорости ветра от высоты. Показатель степени определяется типом ландшафта территории. Массив данных о характеристиках скорости ветра, так же как и о падающей солнечной радиации, метеорологических параметрах и т.д., охватывает всю территорию Земли и имеет разрешение $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе. База данных доступна через Интернет .

Используя указанные современные виды источников данных, следует принимать во внимание необходимость их верификации по данным метеостанций России. Результаты такого сравнения позволяют выбрать основу, как для расчетов потенциала территорий, так и картографирования элементов этого потенциала. Как сле-

дует из описания методологии базы NASA SSE [4] при «подгонке» результатов расчетов к данным наземных измерений разработчики воспользовались достаточно обширным массивом данных метеостанций, однако среди этих метеостанций было только 6 российских. Учитывая значительность территории России, а также высокоширотное расположение большей ее части², верификация данных для этой территории приобретает особое значение.

Порядок проведения работы

Задание №1. Знакомство с традиционными источниками данных: климатические справочники [1, 2] и базы данных, доступные в сети Интернет (Мировой центр данных ГГО [5], Мировой центр данных ВНИИГМИ [6]).

1. Используя Научно-прикладной справочник по климату СССР [2] или БД, представленные в сети Интернет [5, 6], выбрать 3 метеостанции на территории России с наиболее полными представленными данными по характеристикам:

- ветровой энергии (повторяемость скорости ветра, средние скорости (месячные и годовые), характеристики затишья);
- солнечной энергии (средние значения (месячные, годовые) прямой (на нормальную поверхность), рассеянной и суммарной солнечной радиации (на горизонтальную поверхность).

2. Собрать и структурировать данные по каждой станции в таблицы в среде Microsoft Excell.

3. Построить диаграммы повторяемости скорости ветра для каждой метеостанции (высота флюгерных измерений).

4. Провести сравнительный анализ точек (метеостанций) по характеристикам ветра: максимальная среднегодовая скорость ветра, скорость ветра с максимальной среднегодовой повторяемостью, максимальная повторяемость затишья (скорость ветра от 0 до 2 м/с).

² Ошибки определения актинометрических и метеорологических параметров возрастают с ростом широты [2].

5. Провести сравнительный анализ точек (метеостанций) по характеристикам падающей солнечной радиации: максимальная среднегодовая суммарная солнечная энергия на оптимальную поверхность, - то же на горизонтальную поверхность, максимальная среднегодовая прямая радиация на нормальную к лучу поверхность.

6. Проиллюстрировать и обосновать заключение.

Задание №2. Знакомство со спутниковыми базами данных (NASA Surface meteorology and Solar Energy [4]).

1. Зайти на сайт <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

2. Открыть последовательно окна Meteorology and Solar Energy - Regional data subsets. Зарегистрироваться на сайте для дальнейшей работы.

3. Задать границы региона, по которому необходимо получить данные. Собрать и структурировать в таблицы следующие характеристики энергии солнца и ветра: 1) средние скорости ветра (месячные и годовые) на высоте 10 м для поверхности типа «Аэропорт»; 2) средние скорости ветра (месячные и годовые) на высоте 50 м для типа поверхности, соответствующего ландшафту выбранной территории; 3) повторяемость скоростей ветра на высоте 50 м; 4) средние значения (месячные, годовые суммы) прямой радиации на нормальную к лучу поверхность, 5) средние значения (месячные, годовые суммы) суммарной радиации на горизонтальную поверхность, 6) средние значения (месячные, годовые суммы) суммарной радиации на оптимальную поверхность; 7) оптимальный угол наклона поверхности (средние месячные и годовые значения).

4. Полученные данные собрать и структурировать в таблицу Excell.

5. Провести сравнение сопоставимых характеристик для наиболее географически близких точек по данным наземных метеорологических измерений (см. задание 1) и по данным БД NASA SSE:

- средние месячные скорости ветра на высоте 10 м;
- средние месячные суммы суммарной падающей радиации на горизонтальную поверхность;

- средние месячные суммы прямой радиации на нормальную к лучу поверхность

6. Построить XY-диаграмму среднемесячных значений суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, прямой солнечной радиации на нормальную лучу поверхность, и средних скоростей ветра на высоте 10 м. для соответствующих географических точек по многолетним метеорологическим данным и данным БД NASA SSE. Рассчитать количественные оценки разброса значений по образцу (рисунок 2).

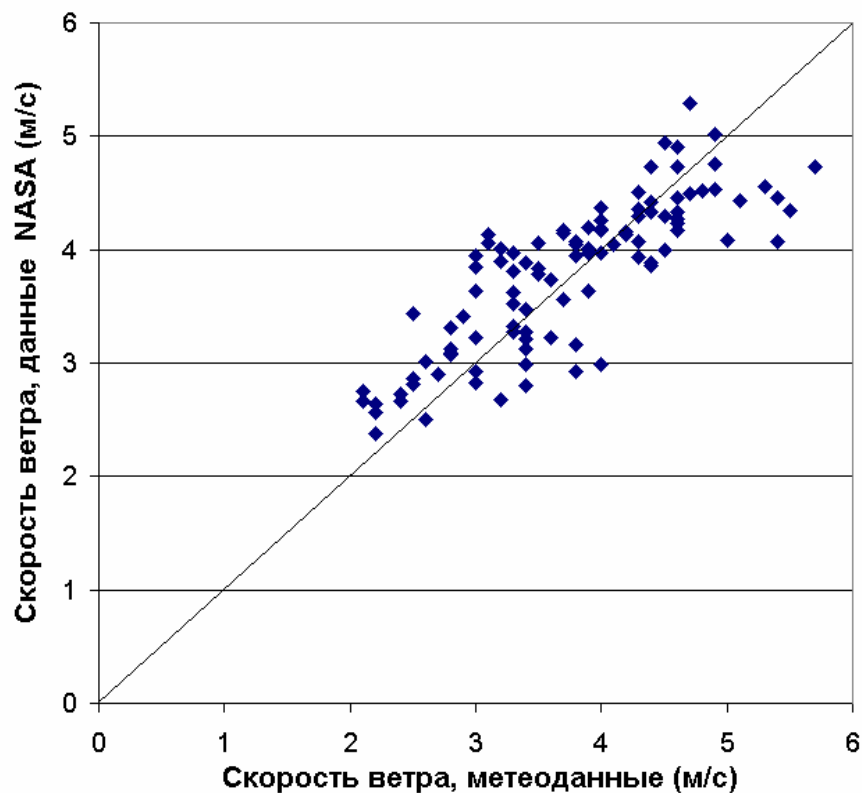


Рисунок 2 - Диаграмма рассеяния для среднемесячных скоростей ветра, полученных из базы данных NASA и наземных метеонаблюдений (выборка из 9 пунктов наблюдений, метеостанции Южного федерального округа). Результаты статистической обработки данных: $V_{\text{ср.метео}} = 3.93$ м/с; $V_{\text{ср. NASA}} = 3.85$ м/с; систематическая погрешность RMS 0.0768 м/с; среднеквадратичное отклонение 0.4317; коэффициент корреляции массивов данных $k_{\text{корр}} = 0.8181$; дисперсия значений (NASA) $\sigma_{\text{NASA}} = 0.4844$

Контрольные вопросы

- Какие характеристики используются для оценки ресурсов энергии ветра и энергии солнца?

- Перечислите источники метеорологических данных для территории России, которые могут быть использованы для предварительных оценок ресурсов возобновляемой энергетики.
- Достоинства и недостатки многолетних метеорологических данных и данных спутниковых БД с позиций оценки ресурсов ветровой и солнечной энергии.

Рекомендуемая литература

1. Справочник по климату СССР. Часть I— Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Часть III—Ветер. Л.: Гидрометеиздат, 1966-1967 гг.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1985-1986.
3. Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П. П., Борисенко М. М. Атлас ветров России. М.:Изд. «Можайск-Терра», 2000.
4. Сайт базы данных NASA SSE - <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
5. Сайт Мирового центра данных ГГО – http://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwroot/wrdc_ru.htm
6. Сайт МЦД ВНИИГМИ (раздел «Архив погоды» – <http://www.meteo.ru/pogoda-i-klimat/292-w-dairy>

Лабораторная работа №2
КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ
СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ

Рафикова Ю.Ю., Киселева С.В.

Цель работы: Овладение методами картографирования ресурсов возобновляемой энергии территории.

Задача работы: Разработать содержание и построить карты характеристик ресурсов солнечной и ветровой энергии для выбранного региона России.

Принадлежности: Персональный компьютер с доступом к сети Интернет, картографическое программное обеспечение.

Введение в проблему

Для выполнения предлагаемой задачи важным является выбор исходных данных для картографирования солнечных и ветровых ресурсов. Ниже приведены перечни данных, наиболее значимых для практического определения энергопотенциалов, а также примеры их картографирования с использованием традиционных и современных методов.

Наиболее полный набор актинометрических величин, дающих основу для оценки потенциала солнечной энергии, включает в себя следующие характеристики [1]:

1. Солнечное сияние: параметры временного распределения месячной и годовой продолжительности.

2. Составляющие радиационного баланса: а) часовые суммы прямой солнечной радиации, поступающей на нормальную к лучу поверхность при средних условиях облачности; б) часовые суммы прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности; в) средние, максимальные и минимальные суточные суммы суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность.

3. Параметры временного распределения суточных сумм суммарной солнечной радиации и статистические характеристики суточных сумм за каждый день месяца: а) средние, максимальные и минимальные месячные и годовые суммы прямой солнечной радиации, поступающей на нормальную к лучу поверхность; б) средние, максимальные и минимальные месячные и годовые суммы суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, а также в) параметры временного распределения этих величин (среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса) и др.

Пространственная структура падающей солнечной радиации. Использование наземных измерений радиационного режима для оптимизационных гелиоэнергетических расчетов сопряжено с определенными трудностями. Во-первых, количество актинометрических станций на территории России относительно мало, во-вторых, число измеряемых характеристик солнечной радиации на них ограничено. При редкой сети станций зона экстраполяции актинометрических данных в пункты размещения гелиоустановок в большинстве случаев превышает зону репрезентативности актинометрических станций. Поэтому интерполяция и экстраполяция актинометрических данных – важнейшая задача для специалистов-географов.

В работах [2, 3, 4, 5] приведен анализ пространственной структуры падающей солнечной радиации. Ее исследование необходимо для определения радиационных характеристик в пунктах, где актинометрические наблюдения не проводятся, для расчета средних по площади параметров солнечного излучения и др. Обычно определение средней по площади климатической характеристики сводится к ее осреднению по выборочной сети станций. Если сеть редкая, используют данные всех имеющихся пунктов наблюдений. В отношении солнечной радиации на преобладающей части территории России даже этот прием применить нельзя, поскольку площадь, на которую приходится один пункт актинометрических наблюдений колеблется (данные на конец 1980-х – начало 1990-х гг.) от 52 тыс. км² на юге Дальнего Востока и 55 тыс. км² на юге европейской части страны до 225 тыс. км² на севере Западной Сибири и 245 тыс. км² на севере Восточной Сибири.

Потребителю солнечной энергии важно знать величину ошибки использования в интересующей его местности данных ближайшей, а иногда и весьма отдаленной актинометрической станции, т.е. количественную оценку ошибки экстраполяции. При экстраполяции суточных сумм суммарной радиации на расстояние 100 км погрешность суточной суммы составляет [2]:

- зимой и осенью 0,6...0,9 МДж/м²,
- весной и летом 3,2...3,6 МДж/м².

Экстраполяция осредненных за месяц суточных сумм радиации на те же расстояния сопровождается меньшими ошибками.

Для практических задач целесообразно применять линейную интерполяцию сумм радиации по двум точкам. По оценкам, полученным для умеренных широт европейской части страны [2], интерполяция на середину расстояния между станциями (до 400 км) уменьшает ошибки по сравнению с экстраполяцией в 1,5...2 раза для суточных сумм радиации и в 2...2,5 раза для среднемесячных суточных сумм.

Путем интерполяций, с учетом территориальных вариаций преобладающих видов облачности, состава, количества и свойств атмосферного аэрозоля, альbedo подстилающей поверхности, уровня загрязненности атмосферы и других факторов в ГГО им. А.И. Воейкова были составлены карты распределения солнечной радиации по территории СССР, и проведено районирование территории по условиям обеспеченности ресурсами солнечной энергии. На рисунке 1 приведена карта годового прихода солнечной радиации при безоблачном небе, составленная по материалам наблюдений сети актинометрических станций СССР за период их работы (до 1980 г). Видно, что распределение солнечной радиации по территории в целом носит широтный характер. Однако приход суммарной солнечной радиации при безоблачном небе зависит не только от широты места и высоты солнца, но и от региональных климатических особенностей, прозрачности атмосферы и состояния подстилающей поверхности. Действительно, как видно из рисунка 1, отклонение от широтного распределения уровня поступления солнечного излучения проявляется в его увеличении в направлении с юго-запада на северо-восток под влиянием распространения атлантических воздушных масс над Евразией и в заметном его снижении

в летний период из-за муссона на территориях, примыкающих к Тихоокеанскому побережью. Кроме того, на отклонение изолиний от широтного распределения в значительной степени влияет прозрачность атмосферы, которая в свою очередь изменяется под влиянием как естественных факторов – увеличения влагосодержания и запыленности к югу, – так и антропогенных – роста загрязнения атмосферы в промышленных районах.

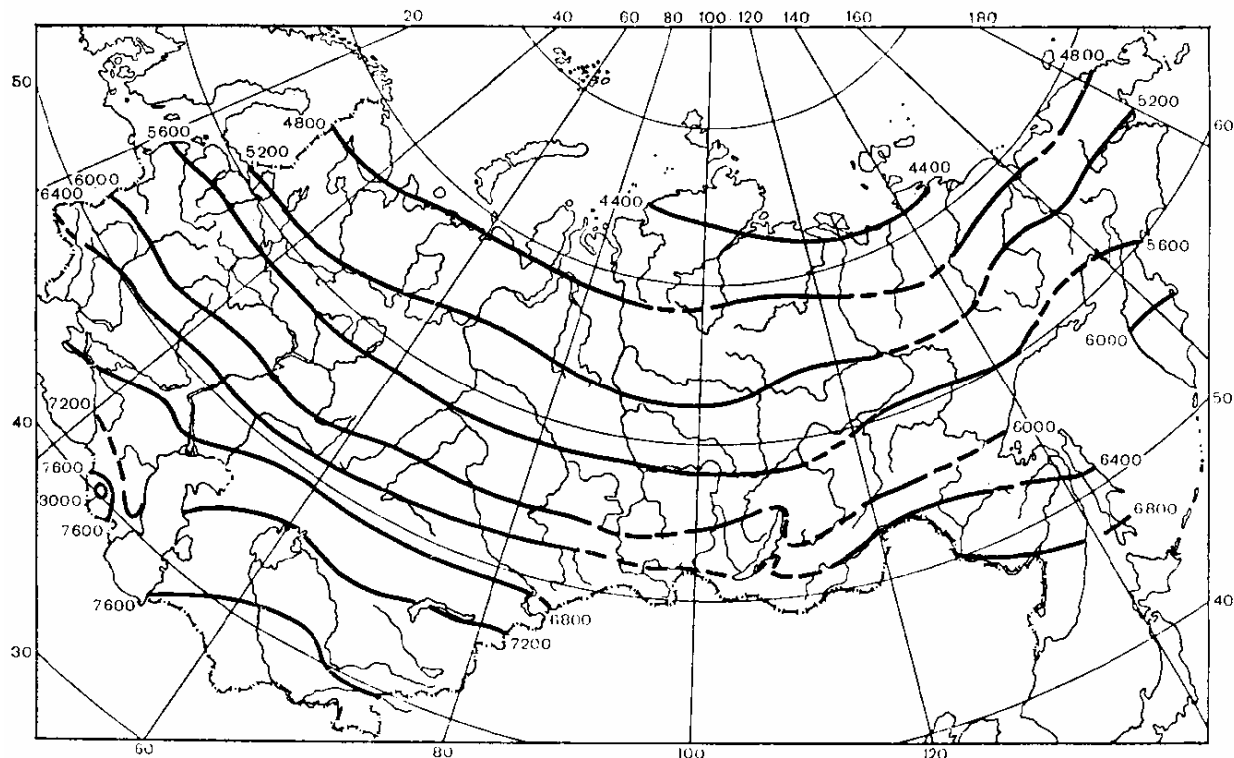


Рисунок 1 - Средняя многолетняя годовая сумма суммарной солнечной радиации при безоблачном небе (МДж/м²) [5].

Временная структура падающей солнечной радиации.

Средние многолетние суммы являются необходимыми, но недостаточными энергетическими характеристиками солнечной радиации. В работах по оценке обеспеченности территории СССР ресурсами солнечной энергии [2, 3] проводился анализ статистических характеристик суточных сумм суммарной солнечной радиации в целях районирования территории страны по типам плотности распределения. Для идентификации выделенных типов использовались коэффициенты асимметрии и эксцесса, их сочетания, суточные суммы суммарной радиации и их изменчивость. Было выделено шесть характерных для территории СССР типов распределения [4]:

I – нормальное; II – положительно асимметричное; III – положительно асимметричное, островершинное; IV – отрицательно асимметричное, V и Va – отрицательно асимметричное, островершинное, VI – бимодальное и VIa – симметричное, плосковершинное, VII – не вошедшие в классификацию горные районы (рис. 2).

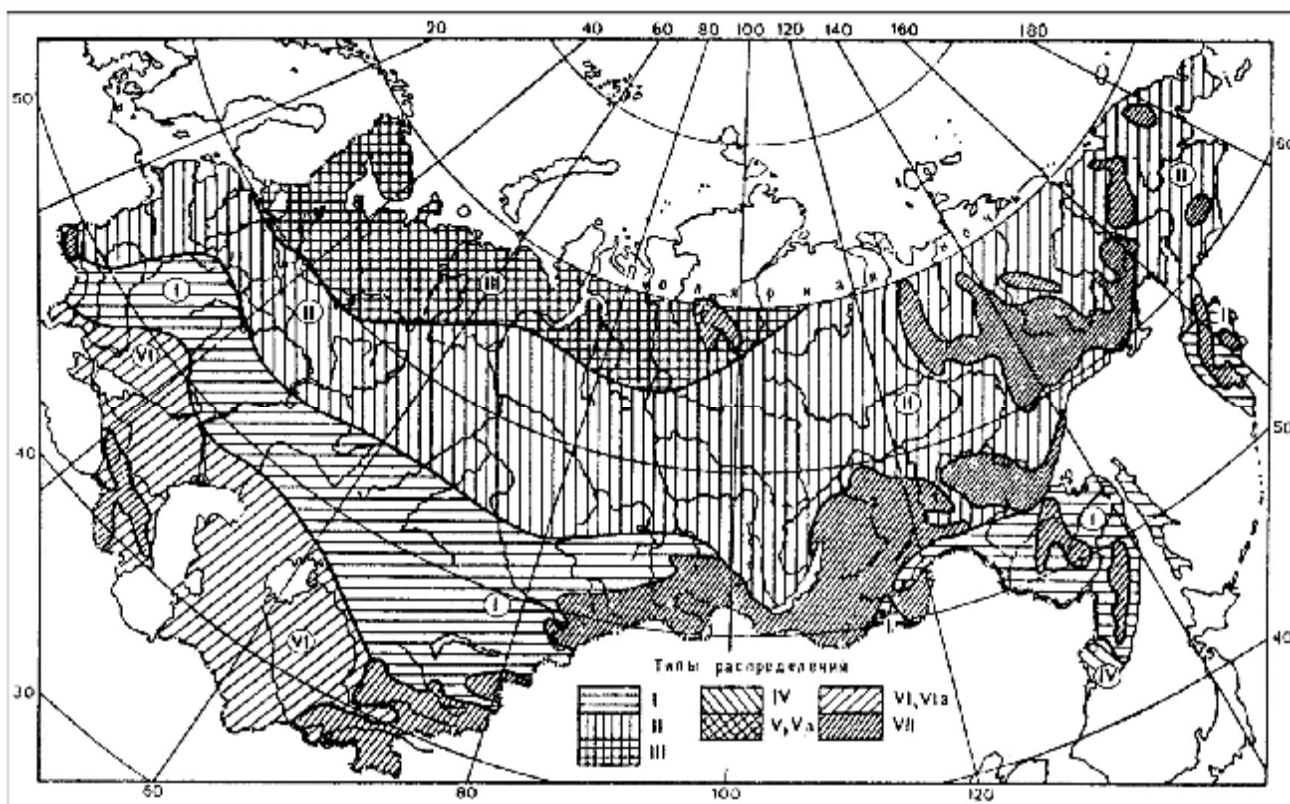


Рисунок 2 – Районирование территории СССР по типам распределения суточных сумм суммарной солнечной радиации. Январь. Типы распределения: I – нормальное; II – положительно асимметричное; III – положительно асимметричное, островершинное; IV – отрицательно асимметричное; V – отрицательно асимметричное, островершинное; VI – бимодальное; VII – горные районы.

Появившиеся в последние годы новые источники метеорологической информации, основанные, в частности, на многолетних спутниковых наблюдениях за поверхностью земного шара, предоставляют более детальные актинометрические и метеорологические данные. В частности, значительно расширяет возможность оценки гелиоресурсов и ресурсов ветровой энергии открытый доступ к базе данных Национального агентства по авиации и исследованию космического пространства США NASA SSE (NASA Surface meteorology and Solar Energy).

Естественно, эти данные не отражают микроклимат отдельных территорий, и в этом смысле требуется их дополнение результатами качественных наземных измерений. С другой стороны, ценность базы данных NASA определяется тем, что она позволяет восполнять недостаток наземных измерений, а там, где они проводятся, дополнить их. БД NASA доступна через Интернет (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) и содержит следующие группы характеристик падающей солнечной радиации и скорости ветра:

Солнечная радиация

1. Среднемесячные дневные суммы (кВтч/м^2) прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную и наклонную (широта– 15° , широта, широта+ 15°) плоскость, на следящую за Солнцем поверхность (для прямой радиации), а также на плоскость, наклоненную под оптимальным (с точки зрения максимума прихода радиации) углом (для суммарной радиации), месячные и годовое значения оптимальных углов наклона.
2. Среднемесячные дневные суммы радиации при ясном небе.
3. Среднемесячная интенсивность (кВт/м^2) суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность в полдень.
4. Среднемесячное число ясных дней. Минимальное и максимальное отклонения от среднемесячной радиации.
5. Среднемесячное значение индекса прозрачности, значение индекса прозрачности при ясном небе, количество дней без Солнца.
6. Характеристики положения Солнца (солнечная геометрия).
7. Минимальная доступная солнечная радиация (%) в течение различных периодов последовательных дней (1, 3, 7, 14, 21 день), дефицит солнечной радиации по сравнению с ожидаемой в течение различных периодов последовательных дней (1, 3, 7, 14, 21 день).

Ветер

1. Среднемесячные значения скорости ветра на высоте 50 м над поверхностью земли (м/с), минимальные и максимальные отклонения от среднемесячной скорости ветра на высоте 50 м, повторяемость ветра, имеющего скорость в интерва-

лах (0...2)...(19...25) м/с для высоты 50 м, среднемесячное направление ветра на высоте 50 м.

2. Среднемесячные значения скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли (для условий местности типа «аэропорт») и разница этих скоростей и скоростей ветра на высоте 50 м (м/с).

3. Скорость ветра на высотах до 300 м для разных типов поверхности.

Таким образом, широкая и специализированная номенклатура данных в БД NASA SSE, не имеющая аналогов частота сетки позволяет преодолевать недостатки предыдущих источников данных для создания карт.

В ходе выполнения задачи практикума предлагается использовать для построения карт массивы БД NASA SSE и картографические программы, которые позволяют создавать, редактировать и анализировать картографическую и пространственную информацию. Организованный массив данных в виде Excell-таблицы формата «широта-долгота-скорость ветра/падающая солнечная радиация/иные характеристики» импортируются в картографическую программу, где затем преобразовываются в таблицу формата .tab, в которой создаются точечные объекты, наносимые на карту. Далее для полученного массива точек строится непрерывная поверхность - растровый массив, образующийся в результате интерполяции значений точечных данных. На полученную таким образом поверхность накладываются границы Российской Федерации/федерального округа/области, границы сопредельных государств, водоёмы; наносится широтно-долготная сетка, обозначаются географические объекты, строится легенда карты и т.д. Все карты выполняются в конической проекции «Долгота-Широта» VGS 84. Коническая проекция (наиболее приемлемая для территории Российской Федерации) может позволить в дальнейшем проводить оценку суммарного потенциала выбранных территорий и обеспечивать иные приложения картографического материала.

Источники данных.

1. База данных NASA SSE, содержащая массивы информации по характеристикам солнечной и ветровой энергии.

2. Топографическая основа, созданная самостоятельно или взятая из доступных источников открытых данных.

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с существующими картами ресурсов солнечной и ветровой энергии (Атласы ветрового и солнечного климатов России ГГО им. А.И. Воейкова [7] и Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России [8]).

2. Подготовить массив данных для региона, выбранного по указанию преподавателя, используя информацию сайта NASA SSE в формате таблицы Excell. Конечная таблица должна включать в себя следующие столбцы: «Долгота», «Широта», «Среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м», «Среднегодовая суммарная солнечная радиация» (ориентация поверхности – по выбору).

3. Создать географическую основу одним из следующих способов [9, 10]:

а) Отсканировать и оцифровать карту из атласа или из имеющегося печатного экземпляра, при необходимости осуществляя генерализацию, используя имеющееся программное обеспечение. Информацию разделить на векторные слои: «административные границы», «населенные пункты», «дорожная сеть», «гидрография», «подписи рек и озер».

б) Использовать бесплатно распространяемые векторные карты, при условии соблюдения необходимой генерализации и оформления:

- DCW (Digital Chart of the World) – Цифровая Международная карта мира масштаба 1:1 000 000. Создана в 1992 г путем оцифровки Международной карты мира (сайт <http://www.maproom.psu.edu/dcw/>), однако ее точность не всегда соответствует данному масштабу. В настоящее время используется в основном для создания карт масштабом мельче 1:10 000 000.

- Vmap0 – новая версия карты DCW. Создана в 1997 г; в данной версии исправлены многие ошибки, частично обновлены данные (сайт <http://gis-lab.ru>). Vmap0 можно использовать в любых (в том числе коммерческих) целях, за исключением слоев административных границ, которые являются собственностью ESRI.

Атрибутивная информация представлена на английском языке, однако, на сайте <http://gis-lab.info/qa/vmap0-settl-rus.html> имеется русскоязычный слой населенных пунктов.

- Границы административного деления РФ можно получить с сайта <http://gis-lab.info/qa/rusbounds-rosreestr.html>. Доступны в виде слоя линейных границ и полигональных объектов.

- OpenStreetMap. Это свободный проект по совместному развитию общедоступных карт и схем городов, улиц, дорог (сайт <http://www.openstreetmap.org>). Карта ежедневно создается и обновляется пользователями по всему миру. Представлены все те же слои, что и для Vmap0, но с большей подробностью и точностью для социально-экономических объектов.

Все векторные источники требуют при использовании дополнительной обработки, генерализации или детализации, графического оформления и дополнительного согласования слоев.

Полученную цифровую основу экспортировать в какой-либо графический пакет, при этом осуществить пространственную привязку векторных слоев.

4. Составление карты.

Топографическая основа.

На топографической основе должны быть показаны:

а) административные границы и береговая линия (в случае, если субъект имеет выход к морю), границы административного деления на области (районы); все границы следует разделять по цвету и способу отображению (толщиной и типом линий);

б) населенные пункты с подписями их названий (подробность определяется выбранным масштабом карты; например, при масштабе 1:50000 имеет смысл отображать только районные и областные центры);

в) основные элементы гидрографической сети с подписями их названий (в данном случае не имеет смысла отображать малые реки, чтобы не перегружать карту).

Тематическая нагрузка.

При выполнении работы в ГИС-пакете необходимо добавить на карту слой данных показателей ветровой и солнечной энергии. Для этого в картографической программе открыть подготовленный файл Excel, по которому создать от-

дельный слой точечных объектов, взяв значения долготы-широты из соответствующих колонок. Данный слой является рабочим, и поэтому не будет отображаться на окончательном варианте карты.

Для отображения распределения средних скоростей ветра на выбранной территории выполняется построение тематической карты типа «Поверхность» по значениям из табличной колонки «Средняя скорость ветра на высоте 50 м». Цветовая гамма подбирается индивидуально, но с тем условием, что каждый диапазон должен контрастировать с остальными. Интервал между отображаемыми диапазонами задается вручную и, как правило, составляет 1 м/с, но следует учитывать разброс значений на конкретной территории.

Для отображения распределения ресурсов солнечной энергии выполняется аналогичное построение, только по колонке «Суммарная солнечная радиация».

5. Оформление карты и подготовка к печати.

После отображения всей необходимой информации, создается легенда карты, которая должна включать в себя расшифровку обозначений границ, населенных пунктов, гидрографии и шкалу значений средних скоростей ветра (суммарной солнечной радиации). Затем разрабатывается компоновка карты, названия карты и легенды. Полученную карту можно дополнить текстом, графиками, иллюстрациями. Возможно дополнительное оформление карты при помощи графических редакторов.

По полученным картам следует выделить районы с наиболее перспективными условиями для развития ветровой и солнечной энергетики (максимальные значения средних скоростей ветра и падающей солнечной радиации).

Контрольные вопросы

1. Какие особенности распределения падающей солнечной радиации по территории России являются наиболее характерными?
2. Какие недостатки наземных актинометрических и метеорологических данных преодолеваются при использовании БД NASA SSE?

3. Какие методы можно использовать для преодоления пространственной неоднородности и недостаточности покрытия территории России актинометрическими измерениями при картографировании ресурсов солнечной энергии?

Рекомендуемая литература

1. Справочник эколого-климатологических характеристик г. Москвы (по данным Метеорологической обсерватории МГУ). Том 1. Солнечная радиация, солнечное сияние. Метеорологические элементы и явления. Характеристики пограничного слоя атмосферы. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 2003. С. 35-87
2. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики вычислений. – Л.: Гидрометеоиздат. 1977. 335 с.
3. Стадник В.В. Статистические характеристики суточных сумм суммарной радиации. – Труды ГГО. 1983. Вып. 475. С. 61-68.
4. Стадник В.В. Районирование территории СССР по характеристикам изменчивости солнечной радиации. – В кн.: Материалы XII Совещания по актинометрии. Использование актинометрической информации для нужд народного хозяйства. Иркутск. 1984. С. 90-93.
5. Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат. 1988. 291 с.
6. RETScreen International. Renewable energy decision support center. // 2010. <http://www.etscreen.net>.
7. Борисенко М.М., Стадник В.В. Атласы ветрового и солнечного климатов России. СПб.: Изд-во ГГО им.А.И.Воейкова, 1997.
8. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: ОИВТ РАН. 2010. 86 с.
9. Берлянт А.М. Картография: учебник. М.: КДУ, 2010, 328 с.
10. Прохорова Е.А. Социально-экономические карты: учебное пособие. М.: КДУ, 2010, 424 с.
11. Сайт NASA SSE - <http://eosweb.larc.nasa.gov/>

Лабораторная работа №3

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГИИ ВЕТРА И СОЛНЦА ДЛЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю.

Цель работы: Оценка ресурсов ветровой и солнечной энергии для региона России.

Задача работы: Провести расчет технического потенциала ветровой и солнечной энергии; составить карты распределения технических потенциалов на заданных территориях

Принадлежности: персональный компьютер с доступом к сети Интернет, картографическое программное обеспечение.

Введение в проблему

Ветроэнергетический поток характеризуется временной нестабильностью. Поскольку располагаемая мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра, это обуславливает чрезвычайно высокую чувствительность производительности ветроэнергетических установок к условиям места их расположения. При скорости ветра 10 м/с удельная мощность ветрового потока составляет около 500Вт в расчете на 1 м² площади, ометаемой лопастями ветроустановки, а при скорости 8 м/с эта мощность оказывается в 8 раз меньше. Для сравнения отметим, что удельные энергопотоки в современных энергетических устройствах достигают сотен кВт/м².

Такие особенности ветра как первичного источника энергии затрудняют создание эффективных энергетических устройств, поскольку обуславливают необходимость сооружения ветроколес большой площади, а также создания аккумуляторов энергии. В результате достоверная оценка потенциала ветровой энер-

гии является крайне важной задачей; только в случае ее успешного выполнения, создание ветроэлектростанций будет обоснованно как эффективностью их работы, так и сроками окупаемости.

В основе расчета ветроэнергетического потенциала территории лежит оценка энергии воздушной струи единичного сечения, которая получается за время T :

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = T \frac{r}{2} \int_0^{V_{\max}} V_{\infty}^3 p_V(V_{\infty}) dV_{\infty}. \quad (1)$$

Здесь $p_V(V_{\infty})$ – функция плотности вероятности скорости ветра или функция повторяемости, ρ – плотность воздуха (кг/м^3), V_{∞} – скорость ветра (м/с). Тогда годовой ветроэнергетический потенциал \mathcal{E}_G можно определить как энергию воздушной струи с единичной площадью поперечного сечения, приняв за основу годовую функцию $p_V(V_{\infty}) = p_G(V_{\infty})$ и годовое время $T = T_G = 8760$ часов.

$$\mathcal{E}_G = T_G \frac{r}{2} \int_0^{V_{\max}} V_{\infty}^3 p_G(V_{\infty}) dV_{\infty}. \quad (2)$$

Годовая производительность ветроустановки определяется следующим образом:

$$\mathcal{Q}_B = S_B T_G \frac{r}{2} \int_0^{V_{\max}} V_{\infty}^3 z(V_{\infty}) h(V_{\infty}) p_V(V_{\infty}) dV_{\infty} < \mathcal{Q}_G. \quad (3)$$

Здесь $\xi(V_{\infty})$ – коэффициент эффективности преобразования энергии ветра в механическую энергию вращения ветроколеса, $\eta(V_{\infty})$ – коэффициент полезного действия процессов преобразования механической энергии на ветроколесе в потребительскую форму (кпд рабочей машины), S_B – площадь, ометаемая ветроколесом. Часто годовую производительность ветроустановки представляют в виде:

$$\mathcal{Q}_B = \frac{1}{2} r \left\{ \int_0^{V_{\max}} P(V) \cdot p_{\infty}(V) dV \right\}; \quad (4)$$

В данном случае все параметры ветроагрегата включены в так называемую рабочую характеристику или кривую мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ) $P(V)$. При наличии дискретных данных о повторяемости расчеты проводятся не интегрированием аналитической функции, и соответствующим суммированием.

Как видно из формул (1-4), расчеты выработки энергии ВЭУ опираются на функцию повторяемости ветра, однако недостоверность информации привела в начале XX века к предложению простой формулы расчета производительности ветроустановки на основе средней скорости ветра:

$$Q = T W_p K_{исп} (V_{cp}). \quad (5)$$

где T – годовое время ($T = T_G = 8760$ часов), W_p – рабочая характеристика ВЭУ, $K_{исп}$ – коэффициент использования установленной мощности, равный отношению реально произведенной энергии за определенный период времени к количеству энергии, которое бы получилось при работе ветроустановки с расчетной мощностью в течение всего этого периода времени. Выработанная электростанцией энергия рассчитывается как сумма выработанной энергии всеми ветрогенераторами электростанции.

Однако, для более точной оценки ветроэнергетического потенциала территории необходимы данные о повторяемости скорости ветра. Повторяемость скорости ветра можно рассчитать на основе длительного ряда наблюдений на метеостанциях. Но сеть метеостанций не настолько плотна, чтобы можно было данные их измерений с высокой точностью экстраполировать на всю территорию. Даже в случае проведения специализированного измерения свойств ветра (ветромониторинга) на предполагаемой площадке ВЭС, характеристики ветра измеряются в одной точке пространства, а для расчета выработки конкретной ветроустановки необходимы данные по той точке пространства, где будет установлена ВЭУ. Для экстраполяции или создания модели изменения характеристик ветра в пространстве, помимо данных о скорости ветра, необходимы сведения о его направлении, а также о свойствах поверхности (рельеф, шероховатость поверхности), над которой распространяются ветровые потоки.

Помимо проблемы получения данных о скорости ветра в различных географических точках, важным для точных ветроэнергетических расчетов является высота, на которой проводятся измерения. При установившемся ветровом потоке скорость ветра возрастает с увеличением высоты над поверхностью Земли. Для наиболее точного расчета выработки необходимо знать скорость ветра на высоте

оси ветроколеса. Современные ветроустановки имеют высоту башни порядка 100 метров, а так как измерения на таких высотах практически не проводились и не проводятся, то для получения данных используется модели построения высотного профиля ветра.

Таким образом, для оценки ветроэнергетического потенциала территории необходимы следующие исходные данные:

- Ряды измерений скорости ветра на двух высотах (желательно, чтобы одна из них равнялась высоте оси предполагаемого ветроколеса);
- Ряды измерений направления ветра;
- Средняя за период температура воздуха;
- Среднее за период атмосферное давление;
- Тип ландшафта, который определяет шероховатость поверхности;
- Рельеф вокруг площадки предполагаемого строительства ВИЭ.

Все эти данные должны иметь точную географическую привязку. Поскольку существует целый ряд разнородных источников данных о скоростях ветра, характеризующихся различной степенью полноты, достоверности и адекватности, оправданным является проведение сравнительного анализа этих источников [3].

Рассмотрим методы оценки технического потенциала³ солнечной энергии территории.

В качестве технического потенциала солнечной энергии территории будем рассматривать в первом варианте расчета удельную выработку электрической энергии фотоэлектр преобразователем (ФЭП) единичной площади, работающим на сеть. Это наиболее простая оценка, поскольку не предусматривает использование дополнительных устройств аккумуляции электрической энергии, что необходимо при сооружении автономных систем энергоснабжения. В этом случае технический потенциал солнечной энергии будет отличаться от природного потенциала (ресурса) на величину, определяемую коэффициентом полезного действия ФЭП и промежуточных систем, обеспечивающих передачу энергию в сеть.

³ Технический потенциал представляет собой ту часть совокупного потенциала, которая может быть эффективно использована с применением известных технологий, принимая во внимание социальные и экологические факторы.

Во втором варианте расчета предлагается принять, что система автономна и содержит в своем составе простейшие кислотно-свинцовые аккумуляторы. Ниже в описании работы приведены методики расчета в соответствии с принятыми условиями.

Порядок проведения работы

Задание №1. Оценка элементов технического потенциала солнечной энергии.

1. Ознакомиться с локальной базой климатических данных для возобновляемой энергетики России. Использовать методическое пособие [2] и соответствующее программное обеспечение.
2. Задав границы региона, по которому необходимо получить данные, а также параметры необходимых данных: средние значения (месячные, годовые) прямой (на нормальную к лучу поверхность) и суммарной солнечной радиации (на горизонтальную поверхность), получить таблицу с характеристиками солнечной энергии.
3. Создать карту распределения суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для региона (работа осуществляется в доступном ГИС-пакете). Подробную инструкцию по подготовке топографической основы и работе в ГИС-пакете см. в описании к работе № 2.
4. Для каждой точки в исследуемом регионе, рассчитать выработку электроэнергии фотоэлектрической панелью стандартных размеров и характеристик.

Методика расчета.

Для фотоэлектрических преобразователей, работающих на электрическую сеть, энергию, произведенную ФЭП за определенный период времени можно считать пропорциональной сумме солнечной радиации за этот период, приходящей на поверхность фотоэлектрического преобразователя. Расчет рекомендуется проводить для фотоэлектрических модулей с известными характеристиками (пиковой мощностью). Усредненная дневная выработка для группы фотоэлектрических модулей количеством N_m в i -ом месяце определяется как:

$$E_{avd\ i} = \eta_{inv} * \eta_{pv} * N_{ss} * S_{ss} * N_m * I_i / 100,$$

где входящие величин представлены в таблице 1.

В случае сетевой энергоустановки при расчетах учитывается только КПД инвертора. В случае автономной установки предполагается обязательное присутствие в системе аккумулятора. Соответственно, при расчетах необходимо учесть КПД аккумулятора (определяется как отношение напряжения разряда к напряжению заряда), КПД контроллера заряда и инвертора. Формула расчета приобретает следующий вид:

$$E_{avdi} = \eta_{inv} * \eta_{pv} * \eta_{cont} * N_{ss} * S_{ss} * N_m * I_i * U_{dch} / (100 * U_{ch})$$

При расчетах предполагается, что в автономной системе используются свинцово-кислотные аккумуляторы. Также предполагается, что используются инверторы и контроллеры с технологией MPPT (отслеживание точки максимальной мощности солнечных модулей) и что мощность потребителя близка к мощности номинальной для этих приборов.

Таблица 1- Технические характеристики фотоэлектрических модулей

№№	Символ	Расшифровка	Ед. измерения
1	I_i	Удельный приход солнечного излучения в i-ом месяце	(кВт*ч/м ² /день)
2	η_{pv}	КПД фотоэлектрического модуля	%
3	η_{cont}	КПД контроллера	%
4	N_{ss}	Количество ФЭП,	шт
5	N_m	Количество модулей	шт
6	η_{inv}	КПД инвертора	%
7	S_{ss}	Площадь единичного ФЭП	м ²
8	E_{avd}	Усредненная дневная выработка	кВтч
9	U_{ch}	Напряжение заряда аккумулятора	В
10	U_{dch}	Напряжение разряда аккумулятора	В

Для упрощения расчетов предлагается создать в программе Excel расчетные таблицы с программируемыми ячейками вида (Таблица 2).

Задание №2. Оценка технического ветроэнергетического потенциала для региона РФ на примере Волгоградской области.

1. Задав координатами границы выбранного региона (Волгоградская область), а также перечень необходимых данных (средние скорости ветра (месячные и годовые), среднегодовая повторяемость скоростей ветра), - получить

из базы климатических данных России таблицу с характеристиками энергии ветра.

2. Создать карту распределения среднегодовых скоростей ветра на высоте 50 м для региона (работа осуществляется в доступном ГИС-пакете). Подробную инструкцию по подготовке топографической основы и работе в ГИС-пакете см. в описании к работе № 2.

Таблица 2 - Пример оформления результатов расчетов

Тип фотоэлектрического модуля		<i>Внести данные</i>		
Производитель:		<i>Внести данные</i>		
Месторасположения установки		Москва		
Случай сетевой электростанции				
Месяц года	Количество дней в месяце	Суточный приход радиации, кВтч/м ² /сутки	Кол-во модулей	Дневная выработка электроэнергии от ФЭП, кВтч
Январь	31	1,66	1	0,200318
Февраль	28	2,7	1	0,325818
Март	31	3,82	1	0,460973
Апрель	30	4,16	1	0,502002
май	31	4,7	1	0,567165
Июнь	30	4,51	1	0,544237
Июль	31	4,53	1	0,546651
Август	31	4,31	1	0,520103
Сентябрь	30	3,17	1	0,382535
Октябрь	31	2,27	1	0,273929
Ноябрь	30	1,58	1	0,190664
Декабрь	31	1,2	1	0,144808
Случай автономной электростанции				
Месяц года	Количество дней в месяце	Суточный приход радиации, кВтч/м ² /сутки	Кол-во Модулей	Дневная выработка электроэнергии от ФЭП, кВтч
Январь	31	1,66	1	0,160254
Февраль	28	2,7	1	0,260655
Март	31	3,82	1	0,368778
Апрель	30	4,16	1	0,401601
май	31	4,7	1	0,453732
Июнь	30	4,51	1	0,43539
Июль	31	4,53	1	0,437321
Август	31	4,31	1	0,416082
Сентябрь	30	3,17	1	0,306028
Октябрь	31	2,27	1	0,219143
Ноябрь	30	1,58	1	0,152531
Декабрь	31	1,2	1	0,115847

Получить значения повторяемости скоростей ветра для сетки (1x1 географический градус) из базы данных ветровой энергетики Волгоградской области (см. http://gis-vie.ru/index.php?option=com_regionmeteo&view=sun&Itemid=110)

3. Рассчитать выработку электроэнергии ветроустановками на основе технических характеристик, приведенных в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 - Технические характеристики ветроустановок

№ п/п	Производитель	Модель	Мощность, кВт	Высота мачты, м	Диаметр ветроколеса, м	Ометаемая площадь, м ²
1	Nordex	NORDEX N 27-50	150	50	27	572.56
2	Vestas	VESTAS V47-50	600	50	39	1194.59
3	Nordex	NORDEX N 60-50	1300	50	60	2827.43

Таблица 4- Зависимость мощности (Вт) ветроустановки от скорости ветра (м/с)

Тип установки	Скорость ветра, м/с													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
NORDEX N 27-50	0	0	0	0	8	19	31	55	83	110	136	160	170	176
VESTAS V47-50	0	0	0	0	2,9	43,8	96,7	166	252	350	450	538	600	635
NORDEX N 60-50	0	0	0	0	25	78	150	234	381	557	752	926	1050	1159

Таблица 5- Расчетные таблицы с программируемыми ячейками

Географические координаты 51 с.ш., 42 в.д.			
Исходная таблица из метеорологической базы данных		Преобразованная таблица из метеорологической базы данных	
Градации скорости ветра, м/с	Среднегодовая повторяемость, %	Градации скорости ветра, м/с	Среднегодовая повторяемость, доли единицы
0 - 2	7	0 - 2	0,07
3 - 6	55	3 - 6	0,55
7 - 10	34	7 - 10	0,34
11 - 14	2	11 - 14	0,02
15 - 18	-	15 - 18	-
19 - 25	-	19 - 25	-

Таблица 6- Результаты расчета мощности и выработки электроэнергии

Скорость ветра, м/с	Значения мощности установки при заданной скорости ветра, кВт	Повторяемость скорости ветра, нормированная на интервал градации	Общая продолжительность заданной скорости ветра, час (в год)	Выработка кВтч
1	-	0,035	306,6	-
2	-	0,035	306,6	-
3	-	0,1375	1204,5	-
4	-	0,1375	1204,5	-
5	8	0,1375	1204,5	9636
6	19	0,1375	1204,5	22885,5
7	31	0,085	744,6	23082,6
8	55	0,085	744,6	40953
9	83	0,085	744,6	61801,8
10	110	0,085	744,6	81906
11	136	0,005	43,8	5956,8
12	160	0,02	175,2	28032
13	170	0,02	175,2	29784
14	176	0,02	175,2	30835,2
15	180	-	-	-
16	175	-	-	-
17	172	-	-	-
18	164	-	-	-
19	155	-	-	-
20	150	-	-	-
	Годовая выработка, МВтч			Сумма

Годовую производительность ветроустановок в каждой точки территории рассчитать по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n W(V_i) p_i(V_i) ,$$

где $W(V_i)$ –мощность ветроустановки в i -м интервале скоростей ветра, а $p_i(V_i)$ – повторяемость скоростей ветра на i -м интервале (градации) скоростей ветра; суммирование проводится по всем градациям скоростей ветра.

Для упрощения расчетов предлагается создать в программе Excel расчетные таблицы с программируемыми ячейками вида (Таблица 5).

4. Создать карту распределения среднегодовой выработки электроэнергии ветроустановкой выбранного типа (работа осуществляется в доступном ГИС-пакете).

Контрольные вопросы

1. Какова структура базы климатических данных РФ?
2. Какие данные включены в базу?
3. Каковы функции и возможные запросы в представленной БД?
4. Каковы методы расчета технического потенциала солнечной энергии?
5. Каковы методы расчета природного и технического потенциала ветровой энергии?

Рекомендуемая литература

1. Сайт: The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set // 2007.
<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

2. Попель О.С., Фрид С.Е., Киселева С.В., Коломиец Ю.Г., Лисицкая Н.В. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие. М.: Изд-во МФТИ. 2010, 56 с.

3. Гридасов М.В. Геоинформационное обеспечение развития ветровой энергетики (на примере Юга России// Магистерская диссертация. Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. 2011 г.

4. Игнатъев С.Г., Киселева С.В. Развитие методов оценки ветроэнергетического потенциала и расчета годовой производительности ветроустановок// Международный научный журнал «Альтернативная Энергетика и Экология», 2010, № 10(90), С.10-35.

Лабораторная работа №4

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ С БАЗАМИ ДАННЫХ ГИС «ВИЭ РОССИИ»

Рафикова Ю.Ю., Киселева С.В.

Цель работы: Изучение структуры и состава ГИС «Возобновляемые источники энергии России» (далее ГИС «ВИЭ России»); знакомство с типами информации и набором функций, необходимых для оценки ресурсов возобновляемой энергии.

Задача работы: Составление на основе БД из ГИС ВИЭ России картографического материала и использование его для оценки перспективности освоения ресурсов ВЭ в конкретной точке.

Принадлежности: персональный компьютер с доступом к сети Интернет, картографическое программное обеспечение.

Введение в проблему

ГИС «Возобновляемые источники энергии России» обеспечивает возможность:

- создавать и преобразовывать массивы географически привязанных данных о ресурсах возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территории регионов РФ;

- получать климатические данные, необходимые для моделирования работы установок на ВИЭ, а также информацию о действующих объектах энергетики на ВИЭ;

- осуществлять визуализацию информации в виде карт, таблиц, графиков, рисунков и фотографий;

- создавать дополнительные массивы данных, тематически связанных с возобновляемой энергетикой (научно-технические и образовательные организации, специализирующиеся в области ВЭ; фирмы-производители оборудования, проектные организации; региональные программы и региональное законодательство в области ВЭ и т.д.).

Структурная схема ГИС представляет собой систему циклов обработки информации, а также взаимодействия между участниками проекта, удовлетворяющую следующему сценарию:

- постановка конкретной задачи с определением параметров и выбором методики.
- отбор данных с поиском, сортировкой и обработкой, применением ИТ-инструментов (прикладные пакеты), структурированием (промежуточных) результатов, включая сопоставление, присваивание, агрегирование, визуализацию и обратную связь.

Пользователи взаимодействуют с главным меню сайта проекта [1] в рамках возможностей CMS. Для углубленной или специфической обработки информации в ГИС ВИЭ, привлекается дополнительное программное обеспечение (ПО). В качестве такого ПО, могут выступать различные пакеты прикладных программ, в том числе для обработки изображений, их тематической интерпретации и т.д. Структурная схема ГИС реализована в следующем виде (Рисунок 1).

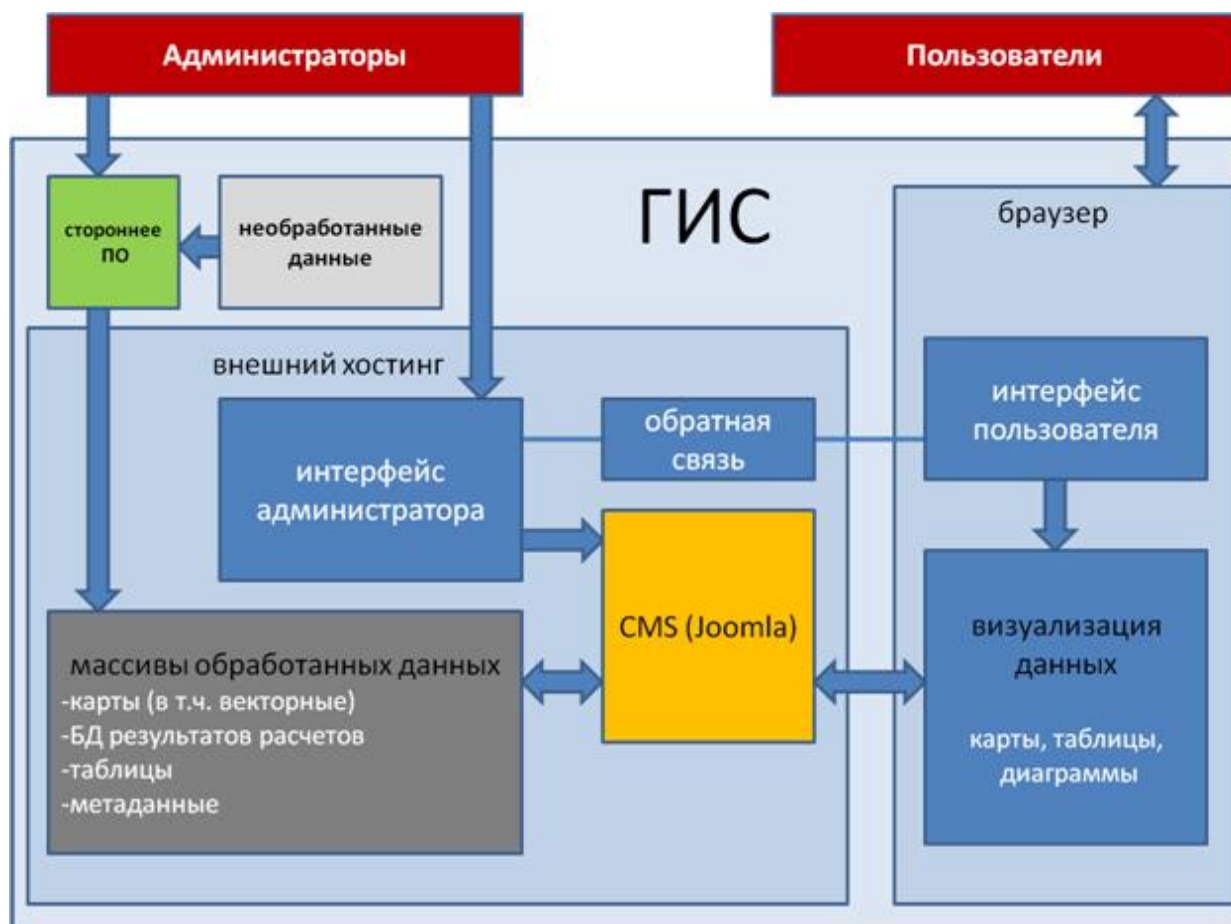


Рисунок 1 - Структурная схема ГИС

В приведенной схеме рабочее место пользователя представляется как произвольная, не оборудованная никаким дополнительным программным обеспечением рабочая станция, подключенная к интернету. Система отображения данных и результатов в реализованной схеме, интегрирована с WEB-интерфейсом и по существу представляет собой инструментал CMS с элементами API Yandex 2.0.

Хранилищем данных служит аппаратно-виртуальный ресурс по типу облачного хранения данных и частично конкретная рабочая станция администраторов.

В качестве инструментов обработки картографической информации можно использовать различные пакеты прикладных программ, такие как MapInfo, ArcGIS, QuantumGIS и прочие. Для углубленной обработки пространственно-привязанных растров (в т.ч. космоснимков) используется специализированное ПО, позволяющее производить – помимо широкого спектра манипуляций с изображением – детектирование некоторых объектов, и тематическую интерпретацию.

Порядок проведения работы

1. При подготовке к выполнению работы изучить структуру, принципы построения и предоставляемые пользователям инструменты для одной из зарубежных ГИС по возобновляемой энергетике. Примеры:

- <http://www.vtenergyatlas.com/> - ГИС возобновляемой энергетики штата Вермонт, США
- <http://www.3tier.com/firstlook/>
- <http://solargis.info/>

2. Ознакомиться с разделами ГИС «ВИЭ России», представленной на сайте [1].

3. Выбрать карту распределения ресурсов солнечной или ветровой энергии для региона России, подготовленную в ходе выполнения лабораторной работы № 2.

4. Из базы данных по фирмам и производителям оборудования в области возобновляемой энергетики (http://gis-vie.ru/index.php?option=com_renergy&view=firms&Itemid=109) выбрать фирмы и производители по соответствующему виду ВЭ. Нанести их на карту.

5. В разделе «Технические приложения» выбрать «Моделирование гибридных энергоустановок» и, задав координаты определенной точки, получить таблицу параметров оптимальных расчетных гибридных установок для указанной географической точки.

6. Оценить перспективность установки на ВИЭ в данной точке, учитывая естественные ресурсы, расположение ближайших фирм, занимающихся возобновляемой энергетикой. Составить перечень факторов, которые следует учесть при выборе оптимального места для строительства установки на ВИЭ.

Контрольные вопросы

1. Какие типы информации представлены в ГИС «ВИЭ России» для отдельного вида ВИЭ (ветер, солнце и т.п.)?

2. Назовите набор функций представленных в ГИС «ВИЭ России» для оценки ресурсов различных видов ВИЭ?

3. Провести сравнение набора данных и функций выбранной зарубежной ГИС и ГИС «ВИЭ России».

Рекомендуемая литература

1. Сайт проекта ГИС «ВИЭ России» <http://www.gis-vie.ru/>

Лабораторная работа №5

ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ БИОМАССЫ ДЛЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

Андреев Т.И., Рафикова Ю.Ю.

Цель работы: Оценка ресурсов биомассы для региона РФ.

Задача работы: Провести расчеты и отобразить на картах элементы потенциала биоэнергетики регионов России.

Принадлежности: персональный компьютер, картографическое ПО, статистические данные (результаты всероссийской переписи населения РФ 2010 г.).

Введение в проблему

Ресурсы биоэнергетики территории России – валовый, технический и экономический потенциал энергии биомассы оцениваются по методике, предложенной в [1]. *Валовый (теоретический) потенциал ВИЭ* – годовой объём энергии, содержащийся в данном виде ВИЭ при полном её превращении в полезно используемую энергию. *Технический потенциал ВИЭ* – часть валового потенциала, преобразование которого в полезную энергию возможно при существующем уровне развития технических средств и при соблюдении требований по охране природной среды. *Экономический потенциал ВИЭ* – часть технического потенциала, преобразование которого в полезную используемую энергию экономически целесообразно при данном уровне цен на ископаемое топливо, тепловую и электрическую энергию, оборудование, материалы, транспортные услуги, оплату труда и т.д.

Расчет энергетического потенциала (ТБО) [1, 2]. Нормы образования твёрдых бытовых отходов принимаются для городских жителей – 1,2 кг/чел*сутки при влажности 50%; для сельских жителей – 0,52 кг/чел*сутки (предполагается, что в сельской местности пищевые отходы используются для корма домашних животных и птицы и не входят в состав отходов). Теплотворная способность (ТБО) принимается равной 0,2 т у. т. (нефтяного эквивалента) на одну тонну сухого вещества (ТБО). Сухими считаются бытовые отходы при влажности 50%. Тогда валовое количество (ТБО), образующихся в регионе за год ($P_{\text{вал}}$):

$$P_{\text{вал}} = \text{население региона} * 1,2 * 365 / 1000 \text{ т/год.}$$

Валовый потенциал энергии (ТБО) ($Q_{\text{вал}}$) рассчитывается с учетом всего населения региона (в т у.т.):

$$Q_{\text{вал}} = P_{\text{вал}} * 0,2 \text{ т у. т.}$$

Технический потенциал – в отличие от валового – вычисляется с учётом различных норм образования отходов для населения городов и сельских жителей:

$$P_{\text{тех}} = (\text{городское население} * 1,2 + \text{сельское население} * 0,52) * 365 / 1000 \text{ т/год}$$

$$Q_{\text{тех}} = P_{\text{тех}} * 0,2 \text{ т у. т. /год.}$$

Экономический потенциал определяется по количеству (ТБО) для городского населения, так как в ближайшие годы, по-видимому, только (ТБО) городов могут быть переработаны.

$$P_{\text{эк}} = \text{городское население} * 1,2 * 365 / 1000 \text{ т/год}$$

$$Q_{\text{эк}} = P_{\text{эк}} * 0,2 \text{ т у. т./год.}$$

Расчет энергетического потенциала осадков сточных вод (ОСВ) [3]. В расчетах следует принять образующееся количество (ОСВ) в сутки на одного человека равное 0,26 кг при влажности 75%. Валовое и техническое количество (ОСВ), создающееся в регионе за год ($P_{\text{вал}}$ и $P_{\text{тех}}$):

$$P_{\text{вал}} = \text{население региона} * 0,26 * 365 / 1000 \text{ т/год;}$$

$$P_{\text{тех}} = \text{городское население} * 0,26 * 365 / 1000 \text{ т/год.}$$

Теплотворная способность 1кг сухого осадка следует принять равным 2000 ккал или 6,8 кг у. т. в год на одного человека. Тогда валовый потенциал энергии биомассы (ОСВ) будет вычисляться по формуле:

$$Q_{\text{вал}} = \text{население региона} * 6,8 / 1000 \text{ т у. т./год.}$$

Технический и экономический потенциалы – это энергетический ресурс (ОСВ) только городского населения, так как предполагается, что в ближайшие годы только осадки городов могут быть использованы для получения энергии.

$$Q_{\text{тех}} = Q_{\text{эк}} = \text{городское население} * 6,8 / 1000 \text{ т у. т./год.}$$

Порядок проведения работы

1. Для выбранного региона РФ рассчитать экономический, валовый, технический потенциал твердых бытовых отходов и осадков сточных вод, используя приведенную в описании методику и статистические данные. Сравнить полученные значения.

2. Провести картографирование ресурсов биомассы.

а) В качестве источников данных использовать:

- Результаты расчетов энергетического потенциала органических отходов для регионов (областей, краев, республик) РФ.
- Топографическая основа, созданная самостоятельно или взятая из доступных источников открытых данных.

б) Создать географическую основу в соответствии с методическими рекомендациями к лабораторной работе №2. На топографической основе должны быть отображены административные границы, населенные пункты, гидрография. В пределах выбранного региона должны быть отображены и подписаны области РФ.

в) Составить карты потенциалов биоэнергетики. Для этого при работе в картографическом ПО в слое областей необходимо каждой области добавить информацию о валовом потенциале следующих категорий биомассы (из результатов проведенных расчетов): а) твердые бытовые отходы; б) осадки сточных вод.

При выборе интервалов значений валового потенциала обычно применяют метод естественных интервалов, меняя далее значения границ классов с дробных на целочисленные. После выполненного построения каждой области (району) присвоить определенный цвет; при этом следует руководствоваться принципом: чем больше валовый потенциал биоресурса, тем ярче оттенки цвета.

После отображения всей необходимой информации, создать легенду карты, которая должна включать в себя расшифровку обозначений границ, населенных пунктов, гидрографии и шкалу значений валового потенциала того типа биоресурса, который отображен на карте. Затем разработать компоновку карты, названия карты и легенды. Полученные карты можно дополнить текстом, графиками, иллюстрациями. Возможно дополнительное оформление карт при помощи графических редакторов.

Выделить районы с наиболее перспективными условиями для развития биоэнергетики с точки зрения наличия ресурсов.

3. Для выбранного региона построить карту распределения энергетического потенциала различных видов биомассы: отходов сельскохозяйственного производства (отходы животноводства; отходы птицеводства; отходы растениеводства)

и отходов перерабатывающей промышленности. Данные о потенциале органических отходов сельского хозяйства взять из базы данных ресурсов биомассы http://gis-vie.ru/index.php?option=com_renergy&view=gabrage&Itemid=106. Отобразить соотношение ресурсов различного типа в виде диаграмм.

Контрольные вопросы

1. Дать определение валового, технического и экономического потенциала ВИЭ
2. Каковы особенности расчета валового и технического энергетического потенциала ТБО?
3. Каковы особенности расчета валового и технического энергетического потенциала ОСВ?

Рекомендуемая литература

1. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). Под редакцией Безруких П.П., М. «ИАЦ Энергия», 2007, 270 стр.
2. Систер В.Г. и соавторы «Твёрдые бытовые отходы», М., Издатель АКХ, 2001, 319 стр.
3. Предварительные итоги Всероссийской переписи населения 2010 года. Статистический сборник. М. ИИЦ «Статистика России», 2011, 87стр.
4. <http://www.socpol.ru> – Социальный атлас российских регионов. Расселение и этническая структура. Города и сельские поселения.

Лабораторная работа №6

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ПО СУММАРНОМУ ПОТЕНЦИАЛУ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Нефедова Л.В.

Цель работы: Региональный анализ ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на основании расчета показателя суммарного удельного нормированного потенциала.

Задача работы: Провести расчеты суммарного показателя обеспеченности областей региона ресурсами ВИЭ, выполнить типологию по данному показателю и отобразить результаты на карте.

Принадлежности: персональный компьютер с доступом в Интернет, данные расчетных характеристик ресурсов ВИЭ и по численности населения (по результатам переписи 2010г) по областям РФ.

Введение в проблему

Проблема районирования территорий развивается в географической науке уже много десятилетий в различных направлениях. Особое место занимает районирование территорий по обеспеченности ресурсами. При этом подчеркивается, что природно-ресурсное районирование является базовым для дальнейшего проведения регионального планирования.

Основы учения о роли природных факторов в формировании территориальной структуры хозяйства были заложены в отечественной экономической географии Н.Н. Баранским и получили дальнейшее развитие в работах многих его учеников и последователей [1,2]. Значительный вклад в методологию природно-ресурсного районирования внес А.А Минц. В своих работах он указывал на необходимость при экономической оценке ресурсного потенциала территории использовать не только абсолютные показатели, которые оказываются привязанными к сетке административного деления, но и производные удельные величины, рассчитанные на единицу площади или на одного жителя [3]. Задачи районирования и типологии районов по потенциалу возобновляемых энергоресурсов (как и других природных ресурсов) решаются для целей регионального планирования и развития производственно-территориальных комплексов. Однако экономические оценки территориальных сочетаний природных ресурсов, выражаемые по предложению А.А.Минца в денежном эквиваленте, являются очень сложной проблемой. На современном этапе развития экономической географии при решении практических задач территориального планирования и сравнительного анализа территорий наблюдается тенденция перехода от денежного выражения к относительным единицам (путем различных математических сопоставлений со средними по региону значениями) или же экспертным бальным оценкам.

Особенности природных условий и хозяйственной деятельности определяют региональные различия потенциала возобновляемых источников энергии. Поскольку ресурсное районирование ВИЭ мы можем рассматривать как этап экономико-географического районирования, целесообразно использование в качестве территориальных единиц территории административного деления регионов. При анализе возможностей и перспектив использования ВИЭ и оценке их будущей роли в энергокомплексах регионов, представляется важным рассматривать не каждый ресурс изолированно, а проводить типологию районов, на основе характеристики уровня обеспеченности ресурсами комплекса ВИЭ, имеющих наибольшее значение для данного региона. Для комплексной оценки ресурсов возобновляемых источников энергии предлагается методика расчета суммарного удельного нормированного потенциала ВИЭ в зависимости от количества жителей – потребителей энергии.

В качестве основных показателей потенциала отдельных видов ресурсов ВИЭ могут быть использованы: поступление солнечной радиации на единицу площади, удельный технический потенциал ветроэнергетических ресурсов, удельная мощность перспективных малых гидроэлектростанций (МГЭС), удельный технический потенциал использованием отходов сельскохозяйственного производства в регионе, удельный потенциал использования геотермальной энергии. Все показатели рассматриваются в расчете на 1 тыс. жителей региона.

При сопоставлении показателей, имеющих разный порядок величин, проводим нормирование значений по каждому показателю потенциала ресурсов, что является модификацией алгоритма разработанного В.С. Тикуновым [4]. Алгоритм нормирования показателей позволяет получать синтетические характеристики оценочного положения территориальных единиц по единой шкале и ранжировать данные территориальные единицы на основе этих оценок. Нормализация исходных показателей позволяет преодолеть их разноразмерность, сохранив те же соотношения между видами ресурсов по различным районам. Нормированные значения (a_{ij}) удельного потенциала ресурсов рассчитываются по формуле:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^0}{x_j^{\max} - x_j^0} \quad \begin{matrix} i = 1,2,3...n \\ j = 1,2,3...m \end{matrix}$$

где n - количество территориальных единиц

m - количество показателей потенциала ресурсов (x_{ij}),

x_j^0 - наименьшее значение (по каждому показателю ресурсов) из всех регионов,

x_j^{\max} - наиболее отличающееся от x_j^0 значение показателя.

Такая нормировка дает возможность выразить отклонение всей системы показателей от наилучших и наихудших оценочных значений и тем самым более достоверно с содержательных позиций соизмерить их. Она позволяет устранить количественные соотношения между значениями удельного потенциала по разным видам ресурсов для изучаемых территориальных единиц.

Важным представляется характеристика общей обеспеченности территориальных единиц ресурсами ВИЭ. Для этого предлагается определить суммарные значения по всем удельным нормированным потенциалам (УНП) ресурсов по отдельным видам возобновляемых источников энергии.

Величина

$$S_i = \sum_{j=1}^m \frac{x_{ij} - x_j^0}{x_j^{\max} - x_j^0} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ j = 1, 2, 3, \dots, m \end{array}$$

получила название - «Суммарный удельный нормированный потенциал» (СУНП) [5]. Изложенная методика может служить основой для типологии и регионального анализа территориальных единиц различного масштаба при комплексных оценках обеспеченности территорий ресурсами возобновляемых источников энергии. Для типологии территориальных единиц по значениям СУНП рекомендуем применять метод естественных интервалов, который идентифицирует точки прерывания между классами, используя статистическую формулу, минимизирующую суммарное отклонение для каждого из классов, меняя далее значения границ типов с дробных на целочисленные. Этот вариант наиболее эффективен при выяснении основных группировок в полученных данных. Допустимо проведение типологии и на основании экспертной оценки.

Порядок проведения работы

1. Для заданного региона (ФО) РФ выбрать наиболее значимые виды ресурсов ВИЭ. Обосновать параметры оценки удельных характеристик (на 1 тыс. чел. общего населения или сельского, на единицу площади и пр.).

2. Рассчитать в таблицах Excel, используя приведенную в описании методику, значения нормированного потенциала (экономический, валовый, технический) для административных единиц заданного региона на основе статистических данных *Справочника* [6] с учетом последних изменений в административном делении РФ и данных Переписи населения РФ 2010г. [7]. Для характеристик биоэнергетических ресурсов использовать базы данных по областям РФ, представленные в ГИС «Возобновляемые источники энергии России» на сайте <http://gis-vie.ru> в разделе «Биоэнергетика». Результаты расчетов представить в виде таблицы 1.

Таблица 1. Значения суммарного удельного нормированного потенциала на территории федерального округа (пример)

Административные единицы федерального округа	Значения удельных нормированных технических потенциалов					Значения СУНП
	Гелиоресурсы (производство тепла)	Гелиоресурсы (выработка эл. энергии)	Ветроэнергетические ресурсы	Ресурсы малой гидроэнергетики	Биоэнергетические ресурсы (отх. сельского хоз-ва)	

3. По данным полученных значений СУНП ВИЭ построить диаграммы в Excel, выполнить анализ распределения ресурсов и обосновать проведение типологии административных единиц региона по уровню обеспеченности суммарными ресурсами ВИЭ.

4. Результаты районирования представить на карте, используя топографическую основу, доступные источники открытых данных с отображением административных границы, населенных пунктов, гидрографии. В пределах выбранного региона должны быть отображены и подписаны

административные единицы. После отображения всей необходимой информации, создать легенду карты, которая должна включать в себя расшифровку обозначений границ, населенных пунктов, гидрографии и шкалу значений СУНП. Подготовленную карту можно дополнить текстом, графиками, иллюстрациями о ресурсах ВИЭ. На основании анализа составленной карты выделить районы с наиболее перспективными условиями для использования всего комплекса ресурсов ВИЭ.

Контрольные вопросы

1. История и современное состояние проблемы ресурсного районирования в экономической географии.
2. Территориальные единицы и показатели типологии при ресурсном районировании ВИЭ.
3. Алгоритм нормирования показателей ресурсов ВИЭ. Формула расчета СУНП.
4. Обосновать выбор параметров для расчета СУНП ВИЭ по региону и проведение типологии районов, выделить наиболее перспективные территории для комплексного освоения ВИЭ.

Рекомендуемая литература

1. Баранский Н.Н. Экономическая география. Экономическая картография. Разд. «Учет природной среды в экономической географии».- М., 1956.
2. Гладкевич Г.И. Природные условия и природные ресурсы./Экономическая и социальная география России. Учебник для ВУЗов. Под ред. А.Г.Хрущева. 4-ое изд.М.: дрофа, 2009. с.23-44.
3. Минц А.А. Экономическая оценка естественных ресурсов. М.: Мысль, 1973.
4. Тикунов В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). - Москва-Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. –367 с.
5. Нефедова Л.В. Метод регионального анализа ресурсов ВИЭ на основании расчета показателя суммарного удельного нормированного потенциала //Теплоэнергетика. 2008, №12, С.2-5.

6. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии в России и местным видам топлива (показатели по территориям) Под ред. П.П. Безруких. М. : ИАЦ "Энергия", 2007, 272с.

7. Госкомстат. Окончательные итоги Всероссийской переписи населения 2010 года. http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/perepis_itogi1612.htm

Лабораторная работа №7

ГЕОГРАФИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ МИРА

Берёзкин М.Ю.

Цель работы: Изучение географии возобновляемых энергоресурсов мира с выявлением региональных особенностей их размещения и перспектив использования различных видов возобновляемых источников энергии.

Задача работы: Ознакомление с географией возобновляемых энергоресурсов мира, их разнообразием; странами и регионами, развивающими возобновляемую энергетику; с отраслевой структурой возобновляемых источников энергии мира (солнечная, ветровая, геотермальная и т.д.).

Принадлежности: персональный компьютер, литературные, статистические и справочные данные.

Введение в проблему

География возобновляемых энергоресурсов изучает природные, экономические, экологические особенности развития и территориальной организации возобновляемых энергоресурсов в мире.

В развитии возобновляемой энергетики выделяются три этапа:

1) с конца XIX в. появление и становление гидроэнергетики, зарождение ветроэнергетики;

2) с 1970-х гг. интенсивное инвестиционно стимулированное развитие ветровой и солнечной энергетики на основе имеющихся в традиционной энергетике технологий, комплексных биоэнергетических систем, а также возникновение первых геотермальных и приливных электростанций;

3) с начала XXI в. формирование новейших технологий фотоэнергетики, эффективных преобразователей энергии океана.

Как глобальное явление возобновляемая энергетика стала проявлять себя в 1970-х гг., когда после нефтяного кризиса прекратился безудержный рост энергопотребления индустриальных стран. Энергетический, а за ним и ресурсный кризис привели к тому, что развитые страны стали восприимчивы к ограниченности сырья и топлива. При этом как никогда обострились экологические проблемы, связанные с загрязнением и деградацией природной среды разросшимися промышленными предприятиями. Тогда и заговорили о возобновляемой энергетике как альтернативе загрязняющей природную среду углеводородной.

Как известно, своему рождению индустриальное общество обязано революцией в энергетике. Появление в Англии на угле парового, а затем электрического двигателя послужило началом крупномашинного производства в странах Западной Европы. Уголь стал базовым энергоносителем 1-го, 2-го и 3-го технологического уклада (в циклах Кондратьева). Для 4-го же уклада (со второй половины XIX в.) базовым энергоносителем становится нефть. Что касается 5-го технологического уклада, то еще в 1970-е гг. преобладало оптимистическое мнение о скором замещении нефти ядерной энергией, демонстрирующей тогда экспоненциальный рост. Но трагические события, связанные с авариями на атомных электростанциях, выявили реальные риски и несовершенство ядерных энергетических технологий. Атомная энергетика не стала базовой энергетической технологией. Сейчас в странах-лидерах ядерной энергетики работают над реализацией концепции безопасной эксплуатации атомных электростанций нового поколения. Однако промышленное внедрение их вряд ли возможно в ближайшей перспективе. Поэтому основным фактором формирования современного мирового энергетического пространства все же остается природный газ. С сохранением темпов роста возобновляемой энергетики, увеличением доли газа и снижением доли угля и нефти в мировом энергобалансе базовый энергоноситель выделяться не будет.

Бурный рост возобновляемой энергетики связан не только с техническими и технологическими достижениями, но и с положением дел в традиционной топливной энергетике. Нефть приходится искать во все более труднодоступных

местах. Все трудней становится извлекать из недр ископаемое топливо. Освоение месторождений стоит все дороже и дороже. Стоимость инвестиционных проектов на добычу и транспортировку нефти и природного газа в среднем увеличивается в 3-4 раза за десятилетие в расчете на единицу продукции.

Кроме того, традиционная энергетика характеризуется сложностью и многоступенчатостью, как при добыче, транспортировке топлива, так и производстве энергии. Эксплуатация транспортных путей и трубопроводов сопряжена с повышенным риском аварий, несущих угрозу безопасности людей и ущерб экологии.

Традиционная энергетика за многие десятилетия развития практически достигла предельного коэффициента полезного действия. Технология производства электроэнергии отработана и трудна для совершенствования. В то время как, например, в возобновляемой энергетике потенциал для новых технологий еще далеко не исчерпан. Высокая наукоемкость, разнообразие применяемых материалов и технологических схем дает большой простор для будущего развития. Технологии возобновляемой энергетике за последнее десятилетие пришли к снижению себестоимости производимой энергии. Например, себестоимость солнечных элементов с 1980 г. снизилась более чем на 90%, а ветровых турбин - на 65%.

В рамках индустриального общества возобновляемая энергетика альтернативной не стала, потому как не могла обеспечить ни высокие темпы роста, ни объем производства энергии, те которые могла обеспечить традиционная энергетика. Ведь возобновляемые источники энергии, в основном, ориентированы на утилизацию рассеянной энергии, тогда как технология традиционной, топливной энергетике проста – сжигание ископаемого углеводородного топлива. А это при наличии достаточно мощной индустриальной энергетике, созданной еще тогда, когда не так остро стояли вопросы экологии, было гораздо выгодней.

За последние два десятилетия у возобновляемой энергетике появились существенные преимущества:

- более справедливый доступ к энергии вследствие широкой распространенности и доступности возобновляемых ресурсов по сравнению с ископаемыми;

- простота в управлении в отличие от многоступенчатых операций в топливной и атомной энергетике;
- широта возможностей при варьировании мощностей в соответствии с запросами и нуждами потребителей;
- экологичность, в отличие от топливодобывающей энергетике, которая опустошает природу.

В целом возобновляемая энергетика представляет активно развивающуюся нишу в большой энергетике. Нельзя не отметить внутриотраслевые особенности в самой возобновляемой энергетике. Из всех видов возобновляемых энергоресурсов наиболее рекордные годовые темпы роста демонстрируют солнечная (до 50%) и ветровая (30-40%) энергетика.

Возобновляемая энергетика стала приоритетом для стран Европейского Союза. Наиболее активно подобные программы при государственной поддержке реализуются в Германии, Испании и Дании. Основными мировыми центрами развития возобновляемых источников являются страны «триады» – Западной Европы, Северной Америки и Японии. По абсолютному уровню финансирования на США, Японию и Германию приходится 68% общих расходов на развитие возобновляемой энергетике мира. Из других стран выделяются по абсолютным показателям Китай, Индия, Бразилия, на которых вместе со странами «триады» приходится 3/4 общемировой установленной мощности возобновляемых источников энергии.

Необходимость в развитии возобновляемой энергетике существует в развивающихся странах, особенно в тех которые не обладает значительными запасами углеводородного сырья. Кроме того, в этих странах высока доля сельского населения. В такой ситуации гораздо дешевле установить панель фотоэлементов, чем строить линию электропередач или газопроводы, чтобы подсоединить отдаленный район к центральной энергосистеме с помощью линий высокого напряжения. Ожидается, что со временем при распространении новых технологий и инвестиций из стран Центра, регионы тропического пояса могут эффективно развивать возобновляемую энергетике, тем более что ресурсов, например, солнечной энергии там более чем достаточно.

Своеобразная ситуация сложилась в нашей стране. Россия – одна из крупнейших топливодобывающих стран. Она является составной частью евразийской "оси" добычи энергоресурсов, основная часть которых экспортируется в районы лежащие к западу и востоку от этой "оси". В то же время Россия входит в число немногочисленных стран, которые являются одновременно и крупными потребителями топлива. Естественно, что в такой огромной стране как Россия районы нецентрализованного энергоснабжения составляют существенную часть. Но поселения, не имеющие электричества, встречаются и в районах централизованного энергоснабжения. Слишком дорого сейчас стало строить линии электропередач. В таком случае необходимо создание автономных энергоустановок малой мощности непосредственно вблизи потребителя. Это позволит повысить энергетическую автономность и защитить потребителя при перебоях в централизованном электроснабжении. В этой ситуации развитие возобновляемой энергетики сможет помочь автономному снабжению энергией, что способствует преодолению углеводородной зависимости населения.

Порядок проведения работы

1. Ознакомление с технологическими укладами Кондратьева и с местом в них базового энергоносителя. Знакомство с моделью миросистемного анализа «Центр – Полу-периферия – Периферия» для понимания территориальной разнородности развития той или иной отрасли, включая и возобновляемую энергетику.
2. Провести сравнительный анализ традиционной и возобновляемой энергетики. Показать преимущество и недостатки, временную динамику развития одной и другой.
3. Изучение отраслевой структуры возобновляемой энергетики. Какие виды, типы возобновляемых источников бывают, какие и где возобновляемые ресурсы встречаются.
4. Знакомство со странами и регионами, развивающими возобновляемую энергетику. Выявить какие страны являются лидерами («Центры») и почему, а какие нет («Полупериферия» – «Периферия»).

Контрольные вопросы

1. Какие энергоресурсы относятся к возобновляемым?
2. Какие этапы развития прошла возобновляемая энергетика?
3. Какие достоинства и недостатки есть у возобновляемой энергетике по сравнению с традиционной?
4. Какие страны и регионы относятся к лидерам в области возобновляемой энергетике?
5. Какие типы возобновляемых источников энергии демонстрируют наиболее высокие темпы прироста?
6. Почему возобновляемая энергетика слабо развивается в России?
7. Какие предпосылки существуют для развития возобновляемой энергетике в России?
6. Каковы перспективы развития возобновляемой энергетике в мире и в отдельных регионах и странах?

Рекомендуемая литература

1. Глобальная энергетика и устойчивое развитие. Мировая энергетика – 2050 (белая книга) / Под ред. В.В. Бушуева, В.А. Калманова. М.: ИД «Энергия», 2011. 360 с.
2. Мироненко Н.С. Понятие цикличности, схема циклов Кондратьева / в уч. География мирового хозяйства. М: Трэвел Медиа Интернешил, 2012. 352 с.
3. Валлерстайн И. Миросистемный анализ. М: ИД «Территория будущего», 2006. 248 с.
4. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. М.: КНОРУС, 2012. 240 с.
5. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии. / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов, Г.А. Борисов и др. СПб.: Наука, 2002.
6. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 264с.

7. Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А., Соловьев А.А. География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетик мира // Вестник Московского университета, сер. 5, география – №1, 2013 – стр. 28-32.
8. Renewables 2010 Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris, 2011.

Лабораторная работа №8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

Соловьев А.А.

Цель работы: изучение методов лабораторного моделирования энергетики вихревых атмосферных течений.

Задача работы: опытное определение параметров подобия и энергетических характеристик атмосферных вихревых течений в модели дифференциально вращающейся мелкой жидкости; сопоставление данных измерений и натуральных наблюдений с теоретическими расчетами.

Принадлежности: 1) экспериментальная установка с дифференциальным вращением; 2) видеокамера; 3) секундомер; 4) линейка.

Описание явления

Вихревые атмосферные движения являются энергетической доминантой обменных процессов между водной и воздушной средой определяющих динамику земных климатических изменений. Вопросы, связанные с пониманием механизмов возникновения, устойчивого развития атмосферных циркуляционных течений, их взаимодействия с подстилающими водными поверхностями составляют предмет многочисленных современных исследований. Существуют различные взаимодополняющие методы изучения динамических и энергетических процессов в атмосфере. Это - методы натуральных экспедиционных экспериментальных исследований в сочетании с системами космического мониторинга; математическое моделирование с численным решением трехмерной системы нестационарных уравнений переноса массы, импульса и энергии; лабораторное (геофизическое) моделирование с аналоговым воспроизведением многочисленных вариаций

природных процессов. Метод экспериментального наблюдения и измерения физических характеристик маломасштабных аналогов природных процессов позволяет при относительно низкокзатратных усилиях быстро получать наглядные результаты. Адекватность лабораторных и натуральных явлений определяется одинаковостью законов аэрогидродинамики и тепломассообмена действующих как в природных, так и модельных объектах.

В данной работе ставится задача: при различных значениях параметров, определяющих внешние условия провести лабораторное моделирование вихревых структур, формирующихся в дифференциально вращающейся мелкой жидкости с изучением динамики и энергетики взаимодействия разномасштабных движений, возникающих на горизонтальных сдвигах скорости баротропного вихря, без учета конденсационного нагрева, бароклинности и вертикального сдвига скорости основного потока.

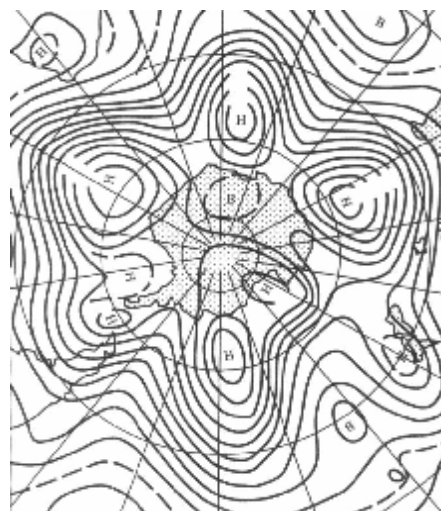


Рисунок 1- Циркуляционные течения в Южном полушарии над Антарктидой с четырехволновыми высотными возмущениями

Дифференциальные вращения являются иллюстрацией атмосферных сдвиговых течений. Формирование сдвиговых течений в природных динамических системах обусловлено фронтальными зонами, в которых создаются скачки температуры или плотности, коррелирующие с горизонтальным циклоническим сдвигом ветра. Равновесное состояние температурного фронта находится в прямой зависимости от поперечно направленного сдвига ветра, который совместно с

эффектом Кориолиса обеспечивает формирование неустойчивых атмосферных течений в виде высотных волн Россби с различными волновыми числами, порождающими циклонические вихри (рисунок 1).

В решении проблемы неустойчивости волновых атмосферных течений и особенностей развития вихревых возмущений на горизонтальных сдвигах скорости во вращающихся системах немало «белых пятен». Отметим некоторые факты, которые относятся к неустойчивости возмущений, характерный размер которых, превышает глубину вращающейся среды. К длинноволновому варианту возмущений относятся волны Россби с частотой $w_R < \Omega$, где Ω - частота общего вращения. В режиме волн Россби отношение центробежной силы от вращения частицы в волне к силе Кориолиса, т.е. число Россби, имеет значения меньше единицы: $Ro = V/L\Omega = w_R/\Omega < 1$.

Фазовая скорость волн Россби V определяется с помощью стандартного приема перехода от уравнений движения к дисперсионному уравнению

$$V = \frac{br_*^2}{k_x^2 r_*^2 + 1}.$$

Здесь k_x – проекция волнового числа в направлении координаты x а совпадающей с движением по часовой стрелке (восток), r - радиальное направление (положительное направление к центру вращающейся системы, т.е. на север),

$r_* = \sqrt{gH}/\Omega$ - радиус Россби- Обухова или баротропный радиус деформации, H -

глубина атмосферы, β -параметр: $\beta = \frac{d\Omega}{dr} - \frac{\Omega}{H} \frac{dH}{dr}$. Этот параметр определяется

изменением вдоль радиуса (меридиана) угловой скорости глобального вращения Ω или глубины H жидкости. Направление распространения волны, как видно, зависит от знака β . При $H = \text{Const}$, для $d\Omega/dr > 0$ волна идет на запад, против глобального вращения. Если $\Omega = \text{Const}$, а $dH/dr > 0$, то волна может перемещаться на восток по направлению глобального вращения.

Для теоретического описания процессов гидродинамической неустойчивости циркуляционных вихревых течений со сдвигом скорости в литературе ис-

пользуется аналогия с двухмерной газодинамикой. Уравнения движения идеальной несжимаемой жидкости со свободной поверхностью в поле сил тяжести совпадают с уравнениями двумерной гидродинамики баротропной сжимаемой жидкости, роль плотности в которых играет глубина воды H . Используя теорему о сохранении потенциального вихря для квазидвумерных течений, А.М.Обухов и Дж. Чарни получили уравнение, для описания циркуляционных течений. В это уравнение входят два параметра подобия. Сдвиговое число Россби-Обухова Ro , характеризует соотношение сил инерции, связанных с широтным сдвигом скорости и со скоростью глобального вращения Ω . Число Экмана E определяет соотношение сил вязкости и сил инерции, обусловленных приграничными течениями

$$Ro = \frac{\Delta w}{\Omega} ; \quad E = \frac{\nu}{\Omega H^2}. \quad (1)$$

Здесь Δw - горизонтальный сдвиг скорости, ν - кинематический коэффициент вязкости H - глубина атмосферы.

А.М.Обуховым с использованием уравнения для циркуляционных течений получена зависимость между указанными параметрами подобия, которая определяет границу области устойчивых и неустойчивых вихревых циклонических движений, развивающихся на сдвигах скорости:

$$Ro = \chi E^g. \quad (2)$$

Для модели баротропных возмущений вращающихся потоков взаимодействующих с придонными границами установлены следующие значения для коэффициентов χ, g :

$$\chi = v^2 / 4\pi^2 g H_0^2 (1 + \xi^2); \quad g = 0,25.$$

Здесь r_∞ - радиус внешней границы вихря, r_0 - радиус ядра вихря, m, n - целые числа, H_0 - глубина невозмущенной жидкости.

Для баротропного вихря с изменяющимся за счет малой неустойчивости контура завихренности, методом контурной динамики получено выражение, связывающее угловую скорость собственного вращения вихря ω_0 и угловую скорость переносного движения Ω в зависимости от номера моды m возмущающего воздействия :

$$\frac{\Omega}{\omega_0} = \frac{2m}{m-1}. \quad (3)$$

Это соотношение может быть использовано для сравнительной оценки циклонических вихрей различных масштабов.

Экспериментальная установка

Рабочая часть установки (см. рис.2, 3) представляет собой цилиндрический сосуд (1), плоское дно которого было составлено из центрального диска (2) и двух concentрических колец (3,4).

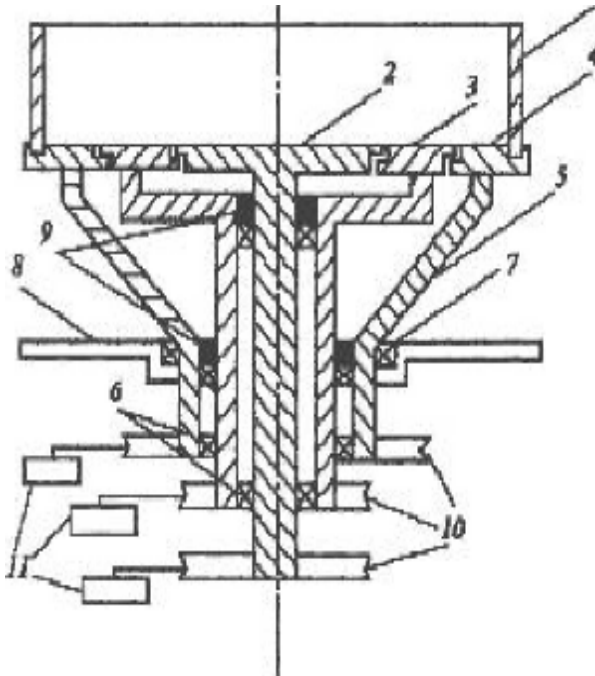


Рисунок 2-Схема установки



Рисунок 3- Общий вид экспериментальной установки

По окружности внешнего кольца (4) жестко крепилась боковая стенка сосуда, выполненная из оргстекла. Размеры сосуда: диаметр 0,46 м, высота 0,25 м. Диаметр центрального диска 0,20 м; ширина среднего кольца 0,10 м, ширина внешнего кольца 0,03 м. Кольца и диски установлены и зафиксированы на верхних концах полых валов. Валы объединены в один телескопический вал (5). Для обеспечения вращения секторов дна в полых валах установлены подшипники (6).

Внешний вал крепится и вращается в опорном подшипнике (7), установленном на монтажном столике (8). Для уплотнения валов применяются манжеты (9), предупреждающие утечку жидкости из полостей, образованных между диском, кольцами и полыми валами. Снизу на каждый вал монтировались с плотной насадкой шкивы (10), на которые посредством систем редукторов передавалось вращение от электроприводов(11) Для каждого вала предназначался индивидуальный двигатель. Для расширения возможностей управления режимами дифференциального вращения использовались шаговые двигатели, которые позволяли выполнять дискретный поворот вала с заданной частотой вращения и снизить флуктуации скорости вращения. Этим требованиям удовлетворяли шаговые двигатели, для которых флуктуации скорости вращения не превышали 1%.

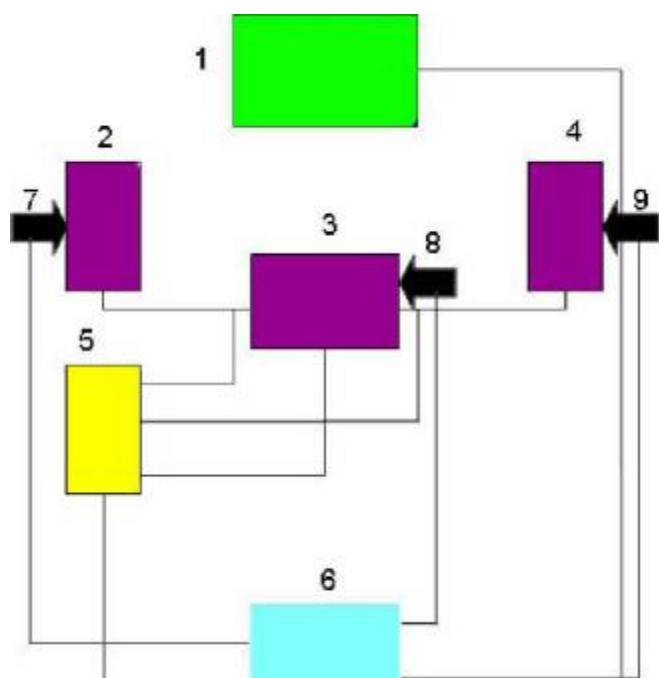


Рисунок 4. Электрическая блок-схема экспериментальной установки. 1 - видеокамера, 2,3,4 - электродвигатели, 5 - блок управления и контроля напряжения, 6 - частотомер, 7,8,9 - фотодатчики, 10 - ЭВМ.

С включением электрического питания, напряжение подается на блок управления и контроля (5), который скоммутирован с ЭВМ для управления подачей напряжения на электродвигатели (2,3,4). Блок управления предназначен для снижения флуктуаций напряжения в электрической цепи до 1%, а также для электронной регулировки электрического питания отдельно каждого двигателя. Частотомер (6) с фотодатчиками (7,8,9), установленными на различных участках установки, предназначен для измерения частоты вращения соответствующих секторов dna цилиндрического сосуда (см. рис.4). Электрический сигнал пропорциональный значению частоты вращения участков dna сосуда, через устрой-

ство сопряжения передается на персональный компьютер. Видеокамерой производится видеозапись картины движений помещенных на поверхность жидкости повторяющих движение вихревых образований возникающих во вращающемся сосуде с водой. Сигнал с видеокамеры передается в персональный компьютер.

Порядок проведения экспериментов

Вначале проводятся подготовительные операции необходимые для поведения лабораторных наблюдений и измерений.

1. Сосуд (1) заполняется водой до (7-10 см.)
2. На блоке управления двигателями (5) по заданию преподавателя устанавливаются набор фиксированных значений угловых скоростей вращения каждого сектора дна. Например, режим с циклоническим вращением диска и антициклоническим (по часовой стрелке) вращением спаренных колец; режим циклонического вращения диска и среднего и периферийного кольца с различными угловыми скоростями.
3. Включается ЭВМ и запускаются программы управления вращением электродвигателей.
4. После включения моторов требуется время для достижения режима перераспределения сил инерции, центробежной силы и сил трения дна сосуда при которых вращение приводов передается телескопическому валу, центральному диску и периферийным кольцам, закрепленным на валах с тем, чтобы они, начинали вращаться с заданной угловой скоростью.
5. Поверхность вращающейся жидкости равномерно покрывается мелкими частицами ликоподия (спорами папоротника) для фиксации структуры движений в дифференциально вращающейся мелкой воде.
6. Значения измеренных частот вращения секторов дна установки записываются в таблицу исходных значений эксперимента (таблицу 1).
7. Произвести видеосъемку поверхностных движений на вращающейся жидкости в течение 1-2 минут вращения сосуда.
8. Данные измерений занести в таблицу 1.

Для каждого опыта вычисляется:

- угловая и линейная скорость собственного вращения периферийных вихрей ω_0 по видеозаписи вихревых движений.

- угловая скорость глобального переносного движения $\Omega = \frac{1}{2} \left\{ \omega_1 + \frac{\omega_2 + \omega_3}{2} \right\}$

- энергия периферийных вихрей E_i в метрических единицах (м) по формуле

$$E_i = \frac{V^2}{2g}.$$

- числа Россби-Обухова Ro , и Экмана E по формуле (1).

Таблица 1. Данные исходных измерений.

№ опыта	Отметка поверхности воды до вращения $H_0, м$	Угловая скорость диска $\omega_1, с^{-1}$	Угловая скорость среднего кольца $\omega_2, с^{-1}$	Угловая скорость периферийного кольца $\omega_3, с^{-1}$	Номер моды вихря m
1					
...					
5					

Обработка результатов измерений

Таблица 2. Результаты расчетов

№ опыта	Ro опыт	E , опыт	Ro, E расчет по (2)	$\frac{\Omega}{\omega_0}$ опыт	$\frac{\Omega}{\omega_0}$ расчет по (3)	$E_i = \frac{V^2}{2g}$
1						
3						

Результаты измерений сопоставляются с литературными с данными для циклонических вихрей и рассчитанными значениями по теоретическим формулам. Результаты вычислений представляются в табличном виде и включаются в отчет. Отчет должен содержать цель работы, краткие теоретические сведения по циклоническим атмосферным движениям и ураганам, анализ полученных резуль-

татов в сравнении с расчетами и данными натурных наблюдений, выводы по решенной задаче.

Контрольные вопросы

1. Смысл чисел подобия Россби-Обухова и Экмана.
2. Какие формы глаза тропического циклона наблюдаются и с чем связываются различные конфигурации центральной части урагана?
3. Что называется баротропным и бароклинным вихрем.
4. Дайте пояснение условий возникновения волн Россби.
5. Энергия тропического циклона и оценки ее величины.
6. Механизм образования ураганов. В каких областях Мирового океана возникают тропические циклоны?

Рекомендуемая литература

1. Алексеев В.В., Киселева С.В., Лаппо С.С. Лабораторные модели физических процессов.-М: Наука,2005.- С.77-147.
2. Бакли Брюс, Хопктнс Э.Уйтекер Р.Погода . Энциклопедический путеводитель.- М.: Махаон,2007.-304 С.126-131,134-140.

Лабораторная работа №9

ЭНЕРГЕТИКА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Соловьев А.А.

Цель работы: Целью работы является изучение эффективности процессов преобразования тепловой энергии солнечного излучения в энергию воздушных потоков и электрическую энергию.

Задача работы: Опытное определение характеристик генератора солнечного ветра: температуры, модуля и вектора скорости потока, расхода и статического давления, коэффициента полезного действия и параметров состояния окружаю-

щей среды: атмосферного давления, влажности воздуха, интенсивности солнечной радиации; сопоставление данных измерений с теоретическими расчетами.

Принадлежности: 1) Экспериментальная установка; 2) Измерители температуры, скорости, влажности, солнечной радиации; 3) Компьютер с программным обеспечением; 4) Генератор дыма.

Описание явления

Солнце — это всех видов энергии на Земле. Солнце излучает каждую секунду $88 \cdot 10^{24}$ калорий теплоты, или $368 \cdot 10^{12}$ ТВт⁴ в мощностном эквиваленте. Но из этого количества теплоты на Землю попадает только $2 \cdot 10^6$ %, что составляет в среднем $180 \cdot 10^6$ ТВт (мощность миллиарда атомных станций). По сравнению с этим все остальные источники энергии, как внешние (излучение Луны, звезд, космические лучи), так и внутренние (внутренняя теплота Земли, радиоактивное излучение, запасы ископаемого топлива и т. д.), пренебрежимо малы. Если общий потенциал Солнца рассчитывать применительно к солнечной энергии, падающей на свободные необрабатываемые земли, то в этом случае среднегодовая цифра составит около 10 000 ТВт, что примерно в 5000 раз больше, чем мощность всех современных стационарных энергетических установок мира. При определении практической целесообразности использования солнечной энергии исходят из того, что максимальное солнечное облучение достигает 1 кВт/м^2 , но это длится всего лишь в течение 1—2 ч в разгар летнего дня. В большинстве районов мира среднее облучение солнечным светом составляет $150—200 \text{ Вт/м}^2$. Но и это много. Так, в России, энергия солнечного излучения, падающего на территорию, почти в 500 раз превышает суммарное энергопотребление.

Люди издавна ощущали могущество Солнца, стремясь взять от него возможно больше. Сначала это проявлялось в желании использовать солнечное излучение с узко утилитарной целью — получить дополнительную теплоту (нагрев воды, отопление помещений, опреснение морской воды и т. п.). Вторым

⁴ Тераватт равен 1000 гигаватт (мощность 1000 атомных станций) ; $1 \text{ ТВт} = 10^{12} \text{ Вт}$.

направлением утилизации солнечной энергии является использование установок, в которых предусматриваются специальные концентраторы солнечной энергии с использованием зеркал и линз.

В дальнейшем появился интерес к преобразованию тепла солнечного излучения в электрическую энергию. К наиболее эффективной технологии получения электрической энергии из тепла солнечного излучения относится паротурбинный способ преобразования энергии в солнечных башенных электростанциях. В этих электростанциях приемник солнечного излучения (котел) размещается на высокой башне, окруженной полем зеркальных отражателей (гелиостатов), с помощью которых солнечное излучение фокусируется на тепловоспринимающей поверхности этого приемника, обеспечивая фазовое превращение теплоносителя в пар, вращающий турбину электрогенератора.

Помимо традиционных способов утилизации энергии возобновляемых ресурсов разрабатываются альтернативные технологии использования тепла солнечного излучения. В частности, к ним относятся генераторы солнечного ветра, в которых создаются воздушные потоки, инициированные солнечным нагревом воздушной среды в полужакрытых «парниковых» системах. Разработаны конструкции энергетических установок, позволяющие концентрировать энергию прямой и рассеянной солнечной радиации, преобразуя ее в энергию воздушных потоков с последующим получением электрической энергии.

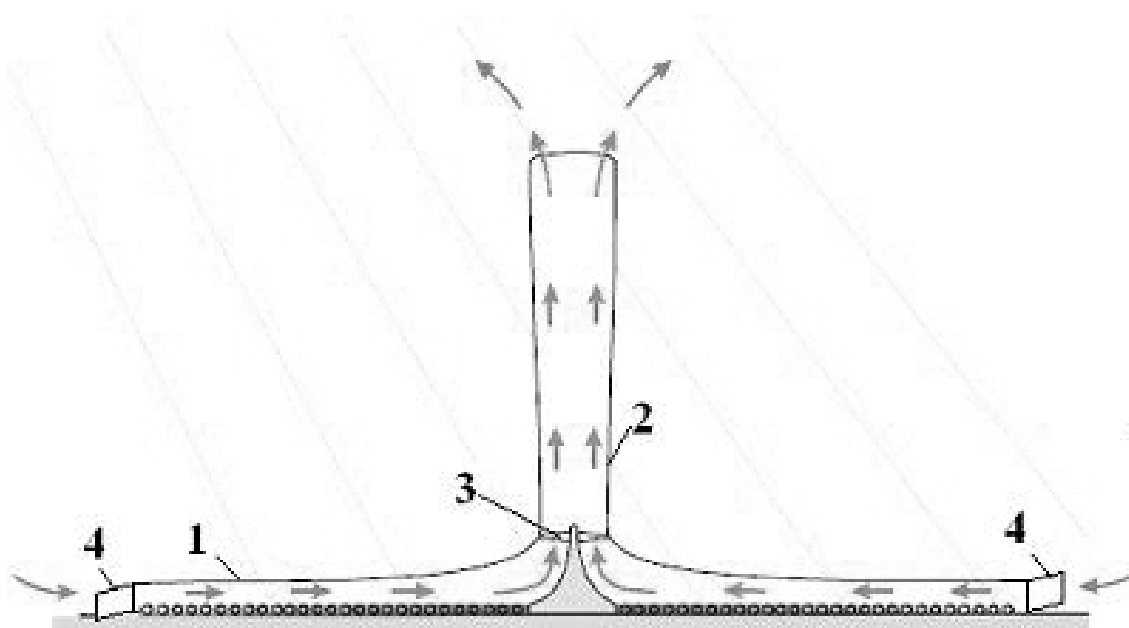


Рисунок 1 - Схема парниковой электростанции.

1 - солнечный коллектор (парник), 2 - вытяжная труба, 3 - турбоэлектрогенератор, 4 - направляющие экраны.

Принципиальная схема парниковой электростанции, состоит из солнечного коллектора с периферийной системой направляющих экранов, трубопроводного концентратора конвективно-ветрового потока и турбины с электрогенератором (рисунок 1). За счет коротковолновой составляющей солнечной радиации в коллекторе, создаются условия для локализации нагрева в приземном слое. При наличии горизонтального градиента температуры в коллекторе и вертикального температурного градиента в вытяжной трубе, расположенной в центре солнечного коллектора, образуются гравитационная неустойчивость воздушных масс, приводящая к восходящему потоку. Энергия этого потока с помощью ветроколеса турбины, соединенной с валом электрогенератора, преобразуется в электричество.

Разработка гелиоветряных или парниковых электростанций, в зарубежной литературе они называются solar chimney- солнечный камин, привлекает внимание многих групп исследователей в связи перспективностью создания автономных систем производства электроэнергии из потоков воздуха, генерируемых солнечным излучением [1]. Одним из принципиальных вопросов, не получивших необходимого решения в технологии генерации энергии в парниковых электростанциях, является поиск способов достижения эффективного преобразования солнечной энергии в кинетическую энергию воздушных течений. Эффективность преобразования инфракрасной составляющей солнечной радиации в энергию воздушных течений, как показывают теоретические оценки, ограничивается предельным термодинамическим циклом равновесной термодинамики, который определяет зависимость коэффициента полезного действия от распределения температуры и давления в атмосфере и, соответственно, от высоты трубы. Поэтому проекты парниковых электростанций, предлагаемые в настоящее время для коммерческого использования, представляют собой системы с гигантскими в сотни метров трубами и громадными в десятки квадратных километров площадями солнечных коллекторов. Только с такими габаритами парниковые солнечные

электростанции, обеспечивают возможность создания высокоскоростных воздушных потоков и значительной движущей силы для привода турбины, необходимой для достижения увеличения установленной мощности электростанций и экономически целесообразной стоимости производимой электрической энергии.

Технология парниковых электростанций, впервые в 1903 году, предложена испанским инженером И. Кабаньесом. Только в 1982 году был разработан инженерно-технический проект и построен первый прототип станции solar chimney в Испании в провинции Мансанарес. Электростанция имела внушительные габариты с солнечным коллектором радиуса 122 м, трубой высотой 194.6 м. Электрическая энергия мощностью 50 кВт вырабатывалась четырехлопастным турбогенератором, установленным в нижней части трубы. Испанская станция функционировала в течение восьми лет, была частично разрушена после грозы и в настоящее время используется в качестве демонстрационной электростанции.

После реализации испанского проекта в ряде стран были предложены крупномасштабные проекты. Австралийский вариант парниковой электростанция в штате Виктория предусматривал строительство энергетической установки с трубой 1000 метров высоты и коллектором 7000 м в диаметре. По проектным решениям эта электростанция мощностью 100 МВт сможет снабжать энергией около 200000 домашних хозяйств, и обеспечивать ежегодное сокращение выбросов CO₂ порядка 900000 тонн. Поскольку крупномасштабные реализации парниковой технологии генерации электрической энергии требуют значительных финансовых затрат в последние годы наметилась тенденция к осуществлению экономически оправданных проектов. К ним относится 200 кВт китайская парниковая электростанция с вытяжной трубой высоты 200 м построенная во Внутренней Монголии. Вместе с этим продолжают работы с маломасштабными моделями направленными на исследование наиболее оптимальных энергосистем солнечного ветра как в отношении производительности по генерации энергии, так и в отношении достижения экономически целесообразных стоимостных показателей

В модели первой парниковой электростанции, предложенной И Кабаньесом, названной им солнечным двигателем, (рисунок 2) фактически использовался принцип действия печной трубы. Конструкция установки представляла собой ка-

меру с площадью солнечного коллектора 1825 м^2 , имеющего в плане форму полукруга и с трубой в середине диаметра коллектора высотой $92,2 \text{ м}$. По расчетам автора в станции должен формироваться воздушный поток скоростью $24,8 \text{ м/с}$, позволяющий на выходе турбины получать электрическую энергию мощностью 48 кВт .

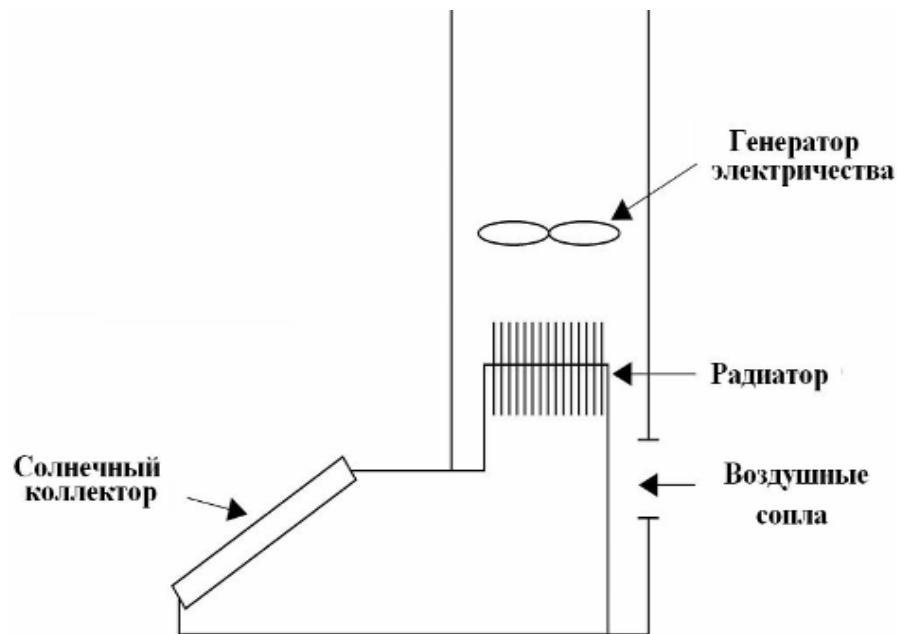


Рисунок 2- Схема солнечного двигателя Кабаньеса.

При расчетах мощности солнечного двигателя принималось, что за счет нагрева воздуха в камере от солнечного радиатора до температуры $T=57^\circ\text{C}$ реализуется термодинамический процесс, соответствующий циклу Карно с эффективностью

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{\Delta T}{T_0} = \frac{30}{27 + 273} \cdot 100 = 10,2\%.$$

Здесь $\Delta T = T - T_0$ разность температур T внутри печной камеры и температуры T_0 вне солнечного коллектора

$$\Delta T = 57 - 27 = 30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Эффективность солнечного коллектора при интенсивности солнечной радиации $G=1000 \text{ Вт/м}^2$ рассчитываемая по формуле:

$$\eta_{\text{col}} = 0,64 - 4,65 \frac{\Delta T}{G},$$

составляла: $\eta_{\text{col}} = 0,64 - 4,65 \frac{30}{1000} = 0,5.$

Мощность энергии солнечного излучения N , собираемая в солнечном коллекторе радиусом $R=24,1$ м и площадью $S_{col} = \pi R^2$ равнялась

$$N = \eta_{col} \cdot G \cdot S_{col} = 912800 \text{ Вт.}$$

В этом случае, электрическая мощность, вырабатываемая турбогенератором с учетом коэффициента Бетца- Жуковского $\eta_{turb} = 0,59$ должна достигать значений

$$P = 0,59 \cdot N \cdot \eta_{Carno} = 0,59 \cdot 912,8 \cdot 0,102 = 48,5 \text{ кВт.}$$

А скорость потока воздуха плотностью $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ набегающего на турбину с площадью ометаемой её лопастями $s = 12,6 \text{ м}^2$ при электрической мощности $P = 48,5 \text{ кВт}$ будет составлять

$$V = \left(\frac{3P}{(1 - 0,59) \cdot \rho \cdot s} \right) = 24,8 \text{ м/с.}$$

Результирующая эффективность солнечного двигателя

$$\eta = 0,59 \cdot 0,5 \cdot 0,102 = 0,03.$$

Высота трубы при вертикальной конвекции и адиабатическом подъеме воздушных масс теплоемкостью $C_p = 1000 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, имеет следующее значение:

$$H = \frac{\eta \cdot \Delta T \cdot C_p}{g} = 92,2 \text{ м.}$$

Приведенные расчеты эффективности модели выполнены в приближении идеального цикла Карно и потому приводили к относительно невысоким значениям коэффициента полезного действия. Между тем, следует обратить внимание на ряд принципиальных конструктивных особенностей модели солнечного двигателя, утраченных впоследствии при разработке технологий аэромеханического способа преобразования солнечной энергии и позволяющих уточнить реальный термодинамический цикл. Это несимметричность конфигурации солнечного коллектора, его герметичность по круговой периферии и поступление воздушного потока в камеру через ограниченный по размерам и регулируемый по расходу вход, аналогичный печному воздухоподдувному устройству, усиливающему тягу в дымовой трубе.

В числе моделей электростанций, повышающих эффективность способ парниковой генерации воздушных протоков, следует обратить внимание на работы французского инженера Эдгара Назаре. Его конвертор солнечной энергии в торнадоподобный поток воздушных масс представлял собой коллектор с тангенциальными направляющими и трубу в виде трубки Вентури. Завихрение воздуха, формирующее в расширяющейся башне Вентури относительно высокий торнадоподобный поток, по замыслу автора, должно было бы заменить высокую трубу электростанций конвективного восходящего течения – «солнечная печь». По расчетам изобретателя электростанция с башней диаметром 300 м, и высотой 300 метров при разности температур на земле и на высоте 1000м порядка 30°C сможет производить электрическую энергию примерно 200 МВт.

Другое направление развития электростанций искусственного ветра планировалось к реализации на основе природных аналогов восходящих конвективных потоков. Французский метеоролог Б. Дубос Dubos в 1929 году предложил проект высоких труб, поднимающихся вдоль гористых берегов над морской поверхностью. Предполагалось использовать энергию воздуха, нагреваемого солнцем под стеклянной крышей коллектора, поднимающегося по трубе и приводящего в действие лопасти ветреных турбин, размещенных в верхней части трубы.

Идея использовать энергию искусственного торнадоподобного потока возбуждаемого от ветра, набегающего на башню с жалюзи, которые открывались с различных сторон по отношению к направлению ветрового потока, разрабатывалась в работах Д. Йена. В одной из модификаций моделей парниковой электростанции канадского метеоролога Мишо предусматривалась возможность формирования искусственного ветра огненными смерчеподобными вихрями типа “dust devils” Свой вариант электростанции он назвал “Atmospheric vortex engine”. Предлагалось торнадо- вихрь создаваемый при нагреве подстилающей поверхности коллектора заключить в невысокую башню, в которой организуются периодические воздействия на нижнюю часть закрученного потока. По мнению автора для получения больших значений электрической мощности с помощью торнадо нет необходимости в создании высокой трубы. Расчеты такой модели в крупномасштабном исполнении показали, что вихрь с поперечным разме-

ром 100 м и вертикальной протяженностью 1 км; генерируемый в башне диаметром 400 м и высотой порядка 100 м будет вполне достаточным для достижения выходной электрической мощности 100 МВт.

В 2001 году в Швейцарии создана маломасштабная модель электростанции на восходящих воздушных потоках. Эта станция получила название Solar City Air Filtre (SCAF) и была предназначена для очистки воздуха вблизи городских автодорог (рисунок 3).



Рисунок 3 - Модель установки SCAF для очистки воздуха.



Рисунок 4 - Макет МГУ для моделирования процессов парниковой генерации энергии [2,3].

Исследования потоков, инициированных лучистым нагревом приземной поверхности, выполнялись также на географическом факультете Московского университета. Были созданы лабораторные модели парниковых установок, с различными конструктивными модификациями, предназначенными для оценки возможностей повышения эффективности преобразования тепла в энергию конвективно-вихревых течений (рисунок 4). Установлено, что интенсивность преобразования лучистой энергии в механическую энергию может изменяться за счет оптимизации периферийного углового момента по высоте вихря вблизи подстилающей поверхности. При оптимальных значениях закрутки коэффициент полезного действия μ преобразования лучистой энергии в энергию конвективно закрученного течения в установке МГУ изменялся в зависимости от угла входа потока в нижний коллектор (рисунок 5).

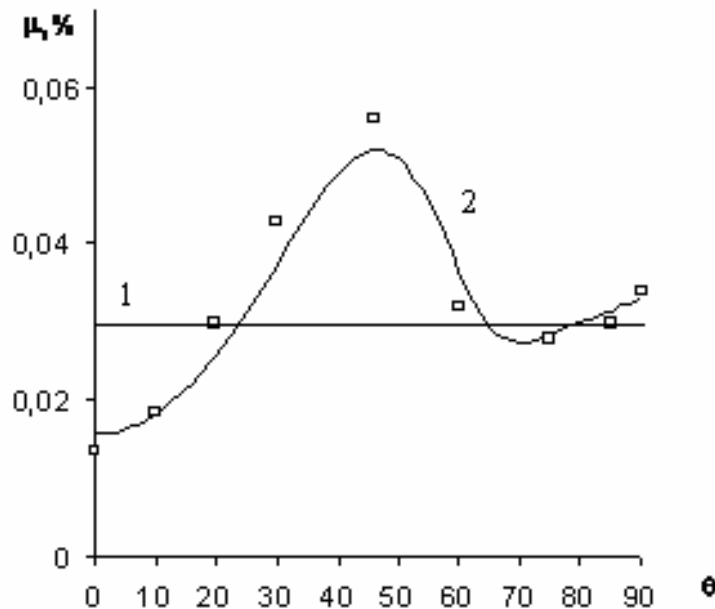


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента μ преобразования энергии лучистого излучения в энергию конвективного закрученного течения в установке МГУ от угла входа потока θ в коллектор. Мощность лучистого излучения $Q = 500$ Вт. 1- расчет для прямого потока; 2- для закрученного течения.

Закрученный поток в макетной установке солнечного ветра позволял в три раза увеличивать преобразование лучистой энергии по сравнению с прямооточным конвективным струйным течением. Расчет коэффициента полезного действия генераторов солнечного ветра по классической формуле $\mu = \frac{gH}{C_p T}$ [4], в которой g , м/с² — ускорение силы тяжести; H , м — высота струи восходящего течения; C_p , Дж/кг К — теплоемкость; T , °С — температура воздуха на уровне Земли, приводит к значению равному $\mu = 0,031\%$. Фактически коэффициент преобразования лучистой энергии в энергию конвективно закрученного потока, полученный в опытах оказался выше расчетных значений. Выявленное расхождение КПД термика и вихря, как показали исследования, связано с тем, что в использованной при расчетах формуле не учтено влияние турбулентной генерации энергии в вихревых потоках.

Эксперименты дают основание считать, что роль граничных условий и формирование вихря является весьма существенным фактором в процессе аэродинамического преобразования лучистой энергии и может рассматриваться как тех-

нически полезная при проектировании солнечных энергетических установок, использующих эффект парникового нагрева.

Для обоснования результатов экспериментальных исследований эффективности процесса преобразования солнечного тепла в энергию вихревого ветрового потока в генераторах солнечного ветра с вихревыми турбулентными течениями была разработана математическая модель процесса преобразования солнечного тепла в энергию вихревого ветрового потока. В математической модели использовалась система дифференциальных уравнений движения и теплопереноса в поле силы тяжести для вязкой воздушной среды:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x_3} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} - \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_3} - 2 \frac{\partial y}{\partial x_3} \Omega = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_3^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial j}{\partial t} + \left(\frac{\partial y}{\partial x_3} \frac{\partial j}{\partial x_2} - \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{\partial j}{\partial x_3} \right) + 2 \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \Omega = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 j}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 j}{\partial x_3^2} \right) - \frac{\tilde{T}}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x_2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial y}{\partial x_3} \frac{\partial T}{\partial x_2} - \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) = \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right) \quad (8)$$

$$\Delta y = j \quad (9)$$

Здесь $\frac{1}{Re} = \frac{\nu}{H\sqrt{gH}}$, $\frac{1}{Pe} = \frac{\lambda}{C_p H\sqrt{gH}}$ - безразмерные коэффициенты обмена, где

Re - число Рейнольдса, Pe - число Пекле; U_1 - составляющая скорости, T - температура, ϕ - потенциал скорости, ψ - функция тока, g - ускорение силы тяжести, t - время, ν и λ - соответственно, коэффициенты молекулярной вязкости и теплопроводности, C_p - теплоемкость Ω - угловая скорость вращения. Для реализации численной схемы расчетов параметров генератора солнечного ветра система уравнений(6)-(9) приводилась к безразмерному виду. В качестве нормировочных единиц использовались: для расстояния - характерный линейный размер H (высота трубы), температуры - T^0 воздуха внутри коллектора, скорости $V - \sqrt{gH}$, времени $t - \sqrt{\frac{H}{g}}$. В численной модели использовалась следующая постановка граничных условий (рисунок б).

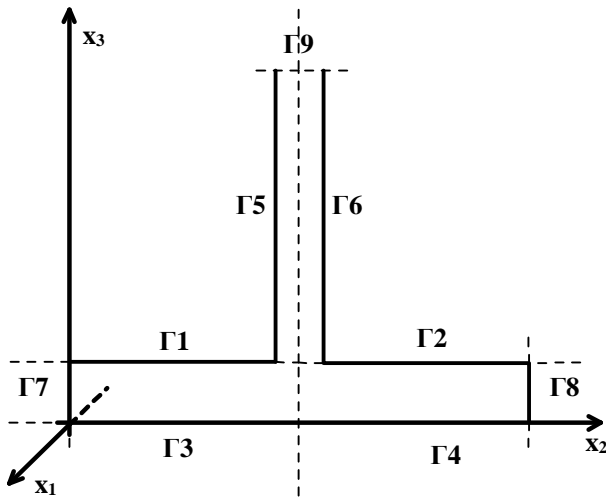


Рисунок 6 – Схема расчетной области и граничных условий при модельных расчетах.

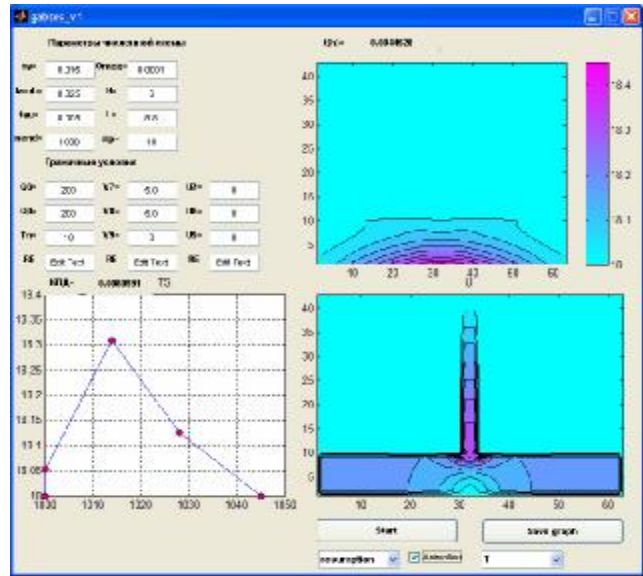


Рисунок 7– Рабочее окно с примером визуализации программы расчета по данным эксперимента коэффициента полезного действия термодинамического цикла преобразования солнечного тепла в кинетическую энергию воздушного потока.

Г1, Г2: $\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0$	Г3, Г4: $-c_0 r l \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q(x_2), U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0$
Г5, Г6: $\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0$	Г7, Г8: $\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, U_1 = U_1^{exod}, U_2 = U_2^{exod}, U_3 = 0$ - входные границы
Г9: $\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial U_1}{\partial x_2} = 0, U_2 = 0, \frac{\partial U_3}{\partial x_2} = 0$ - выходная граница	

Результаты расчета по модели и данные измерений представляются в форме цифровых и графических данных (рисунок 7).

Лабораторная установка

В состав основных узлов лабораторной установки – макета генератора солнечного ветра – входят следующие блоки:

- Коллектор (парник), в котором производится преобразование тепла нагретых воздушных масс в энергию воздушного потока.
- Выводная труба, размещаемая в центре конструкции парника, предназначенная для создания концентрированного вертикально направленного воздушного потока.

- Нагреватель воздуха в парнике, предназначенный для имитации тепловой энергии солнечного излучения в условиях закрытого помещения.
- Турбина и электрический генератор для приема и преобразования энергии воздушных потоков в электрическую энергию
- Система интерфейса и электроники, снабженная набором датчиков и преобразователей энергии для мониторинга и регистрации физических процессов, происходящих в парниковой энергоустановке.

Фотография и эскиз общего вида парниковой энергоустановки с основными конструктивными элементами приведен на рисунках 8, 9.



Рисунок 8 – Фотография учебно-экспериментальной парниковой энергоустановки.

Главным элементом конструкции лабораторной установки является парник 3 (см. обозначения на рисунке 9). Он выполнен в виде несущей конструкции диаметром 2,5 метра. Выводная труба имеет следующие размеры диаметр 0.25 м и высоту 2,0 м с возможностью наращивания до общей высоты 3 м.

С нижней стороны боковой панели расположены направляющие шторки, поворачивающиеся на оси в пределах (0-90) градусов. Каждая шторка вращается независимо от остальных и ее положение жестко фиксируется. С помощью такого механизма допускается реализация различных режимов движения воздуш-

ных масс внутри установки. Можно полностью перекрывать входное окно с любой стороны, создавать различные по направлению воздушные потоки и исследовать влияние интенсивности потоков на процессы переноса воздуха в трубе и парнике.

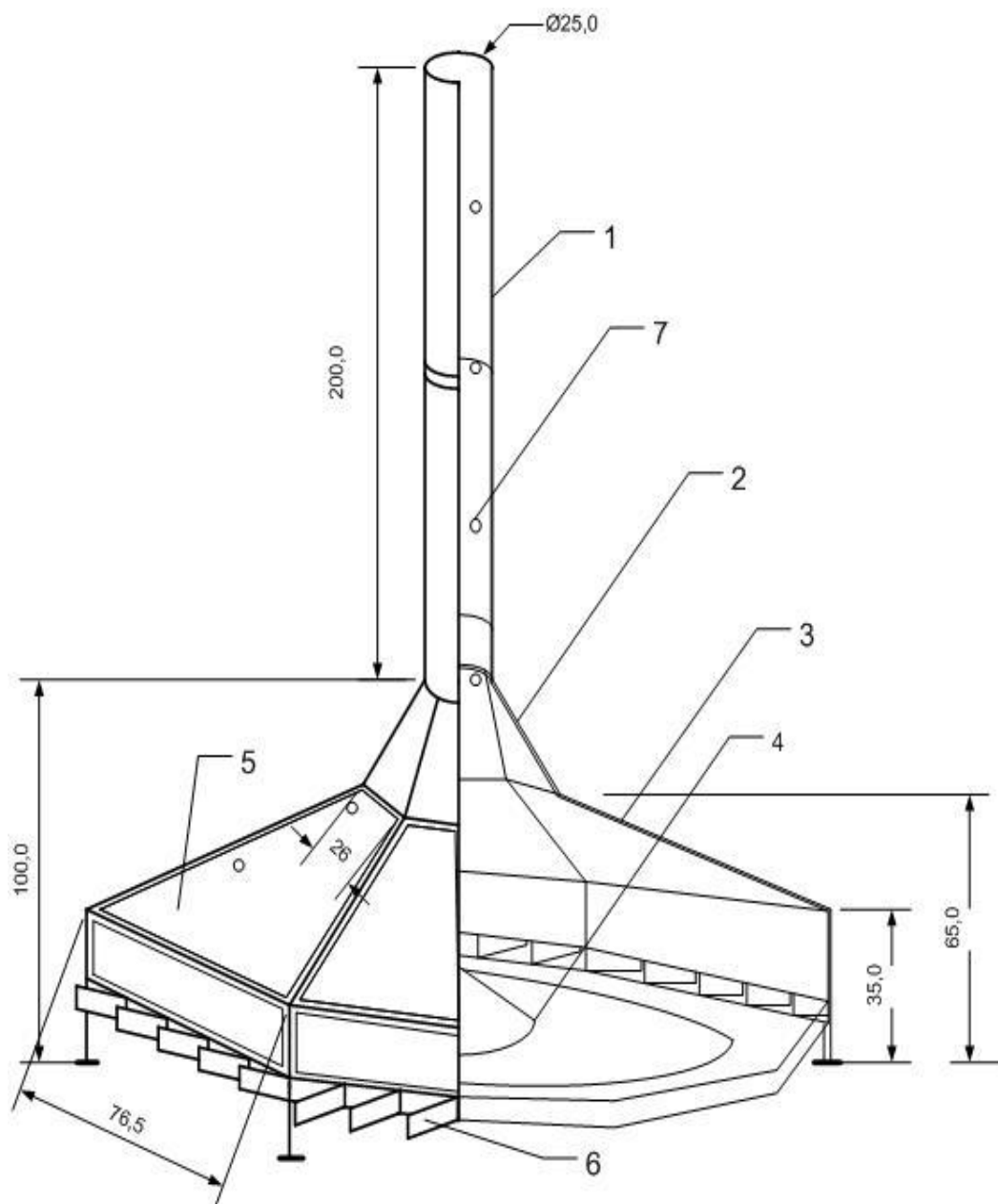


Рисунок 9 – Эскиз общего вида установки. 1 – выводная труба; 2– сглаживающий конус; 3 – парник; 4 – нагреватель-имитатор солнечного облучения; 5 – прозрачная панель корпуса парника – приемник солнечного облучения; 6– направляющие шторки; 7 – точки установки температурных датчиков.

Для имитации тепла в коллекторе, возникающего от солнечного излучения, в конструкцию парниковой энергоустановки введен дополнительный узел, по-

звонящий осуществлять нагрев воздуха в парнике с использованием воздушных тепловых электронагревателей, (ТЭНов). Электрически нагреватели объединены в три ветви, управляемые тремя выключателями. ТЭНы расположены равномерно по периферии круга и обеспечивают пространственную неоднородность нагрева.

Система сбора данных от измерительных датчиков температуры в различных точках установки осуществляется по 8 каналам. В процессе функционирования системы аналоговые сигналы в виде напряжения, пропорционального температуре датчиков, передаются по кабелю в блок микропроцессорной обработки. Аналогоцифровой преобразователь осуществляет оцифровку аналоговых сигналов, в цифровом виде передаются по интерфейсу в компьютер для обработки и отображения. Измерители температуры представляют собой интегральную аналоговую микросхему, использующую в качестве термозависимого элемента температурную зависимость прямого падения напряжения на P-N переходе. Измеритель статического давлений выполнен на базе тензорного датчика малых давлений с рабочим диапазоном измеряемых давлений ± 1 дюйм водяного столба. Для исследования интенсивности воздушных потоков используется крыльчатый анемометр. Анемометр применяется автономно, с использованием собственного пульта управления и отображения.

Аналоговая информация от датчиков в виде напряжения или импульсного сигнала преобразовывается микропроцессорным устройством. Преобразованные в цифровую форму данные передаются в персональный компьютер.

Компьютер под управлением специально разработанного программного обеспечения производит обработку массива данных, отображение результатов на дисплее и запись выбранных данных на диск для архивирования и последующего использования. Персональный компьютер работает под управлением программы отображения и регистрации УДПУ8кТ. Программа создана в среде LabVIEW, версия 8.20. Вид экрана персонального компьютера с работающей программой регистратора температуры при отображении температурного профиля по 8 каналам приведен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Скриншот программы регистрации данных измерений

На экране компьютера отображаются данные по каждому датчику температуры в виде линейных шкал с цифровыми указателями в нижней части каждой линейной шкалы. Справа отображается экран самописца, показывающего динамику изменений по всем каналам. У нижней части каждого градусника расположены окна цифровых дисплеев. Шкалу самописца можно масштабировать в процессе измерений для более детального наблюдения. Для этого достаточно выделить указателем мыши минимальное значение шкалы «0» и ввести с клавиатуры новое значение. Кликнув мышью вне зоны изменений можно зафиксировать сделанные изменения шкалы. Те же действия проделываются с максимальным значением шкалы. В нижней части окна расположены органы управления работой программы. Виртуальная клавиша «Подстройка сдвига», окно ввода «Порт», окно ввода «Период цикла». Виртуальные клавиши «Пуск» и «Стоп». Виртуальная клавиша «Подстройка сдвига» предназначена для вызова группы органов управления начальным сдвигом нуля каждого термометра. Окно ввода «Порт» используется при переносе программы на другой компьютер, где установленный по умолчанию порт COM1 занят. Позволяет выбрать любой из имеющихся в данном компьютере COM портов, к которому подключен регистратор температуры. Окно

ввода «Период цикла» предназначено для изменения периода опроса датчиков. Значение периода в окне в миллисекундах. Для изменения установленного по умолчанию значения 500 мс. необходимо выделить число в окне с помощью мыши и ввести с клавиатуры новое. Допустимое максимальное значение 2000 мс. Виртуальная клавиша «Пуск» предназначена для начала регистрации данных. После нажатия на клавишу «Пуск» на линейных шкалах, цифровых дисплеях и на экране самописца отображается текущая информация. Виртуальная клавиша «Стоп» предназначена для остановки регистрации и записи данных на диск. Нажатие на клавишу прекращает процесс регистрации данных. На жесткий диск компьютера в корневую директорию диска «С» записывается файл текстового формата «udpdata.txt», с зарегистрированными в текущей сессии данными. В файле данные располагаются в виде таблицы. В каждой строке показываются значения измеренных величин по всем восьми датчикам, начиная с 1, снятые в одном цикле. Таким образом, первый столбец будет содержать данные первого датчика, полученные в течение всей сессии. Аналогично второй и т. д. Данные записываются на диск в следующем формате: значение в таблице - температура в градусах Цельсия увеличенные в 10 раз.

Лабораторный модуль парниковой энергоустановки позволяет:

- определять коэффициент эффективности термодинамического цикла при различных интенсивностях солнечного излучения, характерных для разных географических широт, вариациях температур на входе в коллектор и выходе из трубы, изменяющимся аэродинамическим сопротивлением;
- изучать режимы генерации электрической энергии с имитацией метеорологических факторов для различных географических территорий.

Порядок проведения эксперимента

1. Перед началом лабораторных занятий необходимо дополнительно получить у преподавателей единовременный инструктаж и допуск к работе.
2. Для проведения измерений необходимо разместить датчики на объекте измерений в соответствии с указанием преподавателя. Номера датчиков указаны на защитных ПВХ трубках на хвостовиках датчиков.

3. Запустить программу UDPU.exe.
4. При необходимости изменить значения номера порта и периода цикла в соответствующих окнах.
5. Нажать клавишу «ПУСК» .
6. После окончания измерительной сессии в соответствии с планом измерений остановить процесс кнопкой «СТОП». Закрыть программу UDPU.exe.
7. Открыть корневую директорию диска С, убедиться в наличии файла результатов «udpdata.txt» и его корректности. Переименовать файл в соответствии с планом эксперимента. Система готова для следующего включения.

Задание №1. Выполнить исследование зависимости температуры и скорости в генераторе солнечного ветра при различных интенсивностях солнечного излучения, соответствующих географической широте Москвы, Сочи, Иркутска.

1. Провести измерение распределения температуры в коллекторе и трубе.
2. Измерить скорости воздушного потока на выходе из выводной трубы.
3. Построить диаграмму термодинамического цикла при различных интенсивностях солнечного излучения.
4. Рассчитать коэффициент полезного действия преобразования тепловой энергии солнечного излучения в энергию солнечного ветра.

Задание №2. Выполнить исследование эффективности преобразования тепловой энергии солнечного излучения в энергию воздушных потоков генерируемых в лабораторной модели парниковой электростанции при различных углах угла входа потока в солнечный коллектор.

1. Включить электрический нагрев солнечного коллектора соответствующий интенсивности солнечного излучения 300 Вт и затем 500 Вт
2. Установить последовательно углы поворота входных шторок по всему периметру коллектора соответственно на значения, отсчитываемые от радиального направления : 0° , 30° , 45° , 60° , 80° .
3. Провести измерения при заданных условиях: скорости потока на выходе из трубы, температур на входе в установку, внутри коллектора и внутри трубы, влажности воздуха

4. Построить диаграмму термодинамического цикла при различных интенсивностях солнечного излучения.
5. Рассчитать коэффициент полезного действия преобразования тепловой энергии солнечного излучения в энергию солнечного ветра.
6. Сравнить данные измерений с расчетами по программе численных вычислений при заданных условиях эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы электростанций солнечного ветра.
2. Валовой потенциал энергии солнечного излучения падающего на поверхность Земли и технический потенциал ее утилизации.
3. Вывод формулы для коэффициента полезного действия парниковых электростанций.
4. Привести график диаграммы термодинамического цикла Карно для процесса преобразования энергии теплового излучения в генераторе солнечного ветра.

Рекомендуемая литература

1. Zhou X.P , Yang J.K., Ochieng R. M. A review of solar chimney power technology// Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010, 14, P. 2315–2338.
2. Solovyev A.A , Bodronosov A.V. Effect of a surface temperature on development of a convective vortex.// Proceedings Acad. Sci. USSR, Physic of atmosphere and ocean. 1982, V.18 (3), P.331-333.
3. Соловьев А.А., Павловский К.П. Персональная вихревая энергетическая установка// Патент РФ, № 2169859, 2001.
4. Голицын Г.С. Исследование конвекции с геофизическими приложениями и аналогиями. - Л.: Гидрометеиздат, 1973.- 104 с.

Лабораторная работа №10

ЭНЕРГИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА

Соловьев А.А.

Цель работы: Визуальное наблюдение за совершенным гидравлическим прыжком; Определение его динамических и энергетических характеристик

Задача работы: опытное определение сопряженных глубин, высоты и длины и энергии гидравлического прыжка; сопоставление данных измерений с теоретическими расчетами.

Принадлежности: 1) опытная установка - гидравлический лоток;
2) расходомер, 2) секундомер; 3) линейка.

Описание явления

При неравномерном течении жидкости в открытом канале с прямым уклоном дна, когда глубина потока в верхнем бьефе меньше критических значений и меньше нормальной глубины, кривая подпора асимптотически стремится к вертикали снизу вверх, и для ее сопряжения с уровнем нижнего бьефа необходим резкий подъём (прыжок) свободной поверхности струи. В нижний бьеф подпорных гидротехнических сооружений поток, как правило, поступает в бурном состоянии, когда глубина в сжатом сечении меньше критической глубины ($h_c < h_{кр}$). Поток в бытовых условиях отводящего русла, напротив, спокойный и его так называемая бытовая глубина h_6 превышает критическую глубину ($h_6 > h_{кр}$). Переход потока от бурного к спокойному состоянию происходит посредством особой формы движения, называемого гидравлическим прыжком. Впервые явление гидравлического прыжка обнаружено в опытах по наблюдению течения воды из-под щита. Впоследствии прыжок наблюдался при течении через водосливы гидроэлектростанций. В настоящей лабораторной работе прыжок создается по заданию либо при истечении воды из-под щита, либо через водослив практического профиля. Схема гидравлического прыжка представлена на рисунке 1.

Глубины начала h_1 и конца h_2 гидравлического прыжка называются первой и второй сопряженными глубинами. При их отношении $\eta = h_1/h_2 < 0,5$ или при числе Фруда $Fr = \alpha V^2 / gh_1 > 4$ прыжок называется совершенным (V - скорость по-

тока, $\alpha=1,1$ -коэффициент неравномерности течения). Такой прыжок представляет собой резко расширяющуюся транзитную струю с поверхностной водоворотной областью - "вальцом", в котором циркуляционно перемещается практически постоянный по величине (но не по составу) объем воды. Между вальцом и транзитной струей происходит обмен жидкими частицами, сопровождающийся повышенной интенсивностью турбулентности.

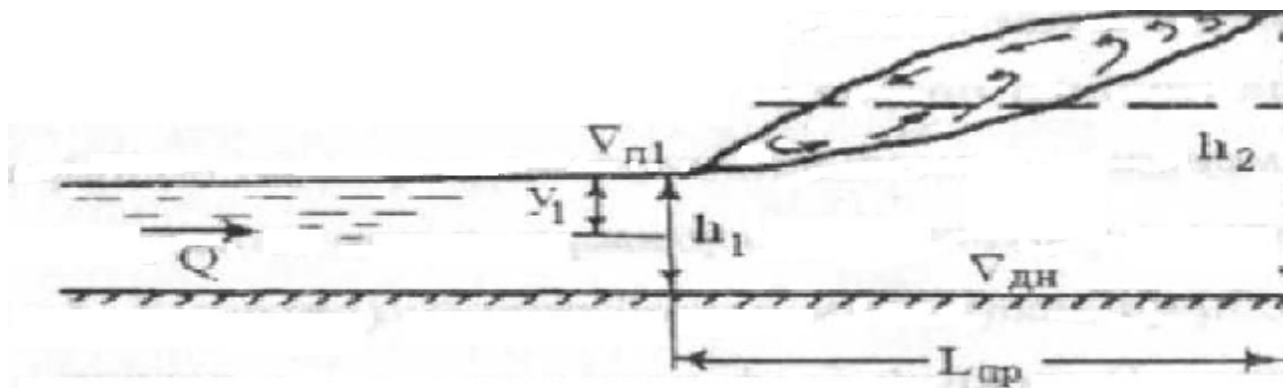


Рисунок 1- Схема совершенного гидравлического прыжка.

Фактически гидравлический прыжок представляет собой расширение турбулентного потока, которое сопровождается необратимой потерей энергии: $\Delta E = E_1 - E_2$, где E_1 - удельная энергия потока до прыжка, E_2 - удельная энергия потока после прыжка. Потеря энергии равная ΔE обусловлена расширением и турбулизацией потока.

Высотой прыжка называется разность сопряженных глубин $a = h_2 - h_1$. Длина прыжка определяется как величина, равная расстоянию $L_{пр}$ между участками потока с глубинами h_1 и h_2 . Связь между глубинами до прыжка и после прыжка устанавливается с помощью уравнения сопряженных глубин - уравнения Беланже (1). Это уравнение может быть получено из закона сохранения количества движения.

$$\frac{\alpha Q^2}{gf_2} + y_2 f_2 = \frac{\alpha Q^2}{gf_1} + y_1 f_1. \quad (1),$$

где Q – расход ; α - коэффициент Кориолиса неравномерности потока; g - ускорение силы тяжести; y_1, y_2 - глубина погружения под свободную поверхность

центра тяжести площади живого сечения площади f_1 , и f_2 соответственно. Обозначим

$$\Theta(y) = \frac{\alpha Q^2}{gf} + yf. \quad (2)$$

Функция $\Theta(y)$ называется прыжковой функцией. Она характеризует поток полной энергии через сечение прыжка. В соответствии с уравнением Беланже (1), прыжковая функция до и после гидравлического прыжка, должна иметь одинаковое значение.

Для прямоугольного русла с площадью живого сечения равной $f = bh$ (b - ширина, h - глубина потока), центр тяжести сечения находится на расстоянии от дна русла равном $y = h/2$ и прыжковая функция принимает следующее значение:

$$\Theta(h) = \frac{\alpha Q^2}{gbh} + \frac{bh^2}{2}. \quad (3)$$

Принимая во внимание формулу для критической глубины потока после водослива $h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}$ выражение прыжковой функции можно записать так:

$$\Theta(h) = b \left(\frac{h_k^3}{h} + \frac{h^2}{2} \right). \quad (4)$$

Если подставить (4) в уравнение(1), то получим:

$$2h_k^3 = h_1^2 h_2 + h_2^2 h_1. \quad (5)$$

Уравнение(5) называется уравнением сопряженных глубин. Решая его относительно h_1 а потом относительно h_2 , получают формулы для расчета сопряженных глубин:

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h_k^3}{h_2^3}} - 1 \right], \quad h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h_k^3}{h_1^3}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Если прыжок начинается в том месте потока, где глубина принимает наименьшее значение $h_c = h_1$ после перелива через плотину водослива гидроэлектро-

станции, то он будет находиться в критическом состоянии при котором $h_1 < h_{кр}$ ($h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}$). В этом состоянии в зависимости от соотношения его второй сопряженной глубины h_2 , называемой раздельной: $h_{разд}$ и глубины воды в отводящем русле h_6 формируется различный динамический режим дальнейшего перемещения гидравлического прыжка. Когда $h_2 = h_{разд} > h_6$ имеет место так называемый отгон гидравлического прыжка. Прыжок начинает распространяться вниз по течению. На участке отгона гидравлического прыжка формируется кривая резкого подъема воды (кривая подпора) с глубинами в граничных сечениях h_c и h_2 (h_2 глубина, сопряженная с бытовой глубиной в отводящем русле). Дальностью (длиной) отгона прыжка $L_{отг}$ называется расстояние между сечениями с глубинами h_c и h_2 . При $h_2 = h_{разд} > h_6$ формируется прыжок, надвинутый на водосливную плотину и не распространяющийся в направлении отводящего русла.

Для расчета длины прыжка в русле прямоугольного поперечного сечения потока может быть использована формула:

$$L_{np} = 10,3 \cdot h_1 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{h_k^3}{h_1^3} - 1 \right)} \right)^{0.81}. \quad (7)$$

Величина энергии в прыжке находится в определенной зависимости с сопряженными глубинами потока. Из уравнения Беланже получается следующая формула для расчетов энергии гидравлического прыжка

$$\Delta E = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2}. \quad (8)$$

Описание лабораторной установки

Опытная установка (рисунок 2) состоит из прозрачного гидравлического лотка 1 прямоугольного поперечного сечения с нанесенной на его боковые стенки координатной сеткой.

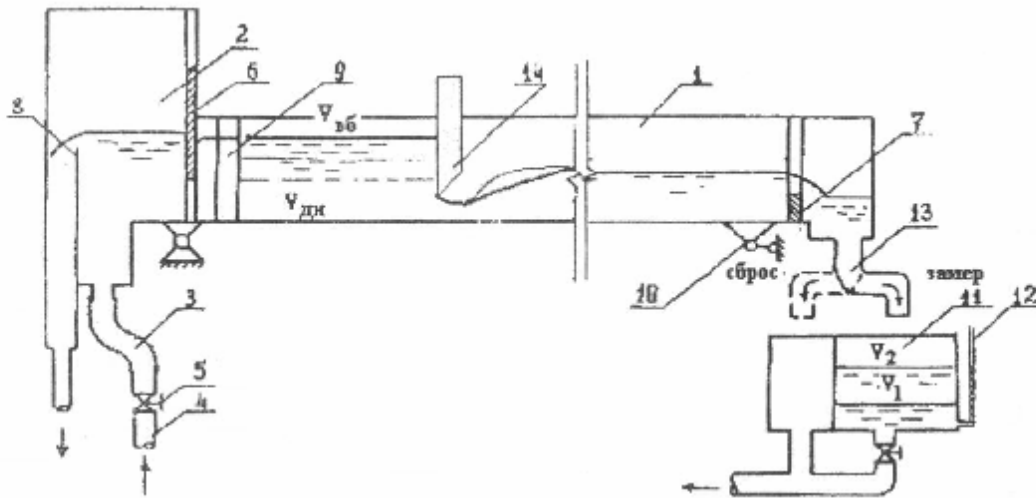


Рисунок 2 - Схема установки для изучения параметров гидравлического прыжка 1 - гидравлический лоток; 2 - напорный бак; 3 - гибкий шланг; 4 - подающий трубопровод; 5 - кран; 6 - плоский затвор; 7 - шандоры; 8 - переливное устройство; 9 - успокоительные решетки; 10 - подвижная опора; 11 - мерный бак; 12 - пьезометр; 13 - перекидное устройство; 14 - исследуемый объект.

Вода в лоток поступает из напорного бака 2, соединенного гибким шлангом 3 с подающим трубопроводом 4. Расход воды, проходящей через лоток, регулируется плоским затвором 6 и набором водобойных затворов разной высоты 7 называемых шандорами. Шандорами может регулироваться уровень воды в лотке. При помощи переливного устройства 8 излишек воды сбрасывается из напорного бака. Успокоительные решетки 9 установлены для стабилизации потока входящего в лоток. Наличие подвижной опоры лотка 10 и гибкого соединения напорного бака с подводным трубопроводом позволяет изменять угол наклона лотка к горизонту. Расход воды, проходящей через лоток, измеряется объемным способом при помощи мерного бака 11, оснащенного пьезометром 12 со шкалой. В качестве исследуемого объекта в данной работе в лоток устанавливается плоский щит прямоугольной формы с шириной равной ширине лотка или водослив практического профиля.

Бурное состояние потока перед гидравлическим прыжком обеспечивается истечением воды из-под щита 14, либо пропуском расхода через водослив прак-

тического профиля. Спокойное состояние потока за гидравлическим прыжком регулируется набором шандор 7.

Порядок проведения эксперимента

1. По указанию преподавателя в лотке устанавливается и закрепляется либо плоский щит, либо водослив практического профиля. При работе с щитом его нижнее ребро не доводится до дна лотка.
2. Поднять затвор 6. Регулируя подачу воды краном 5 и уровень воды ниже щита шандорами 7, установить незатопленный режим истечения с расположением гидравлического прыжка в сжатом сечении.
3. Определить отметку свободной поверхности перед прыжком $\nabla_{п1}$ и за прыжком $\nabla_{п2}$.
4. Мерной линейкой определить длину гидравлического прыжка $L_{пр}$.
5. Перевести перекидное устройство 13 в положение «замер», одновременно включив секундомер.
6. Заполнив мерный сосуд, перевести перекидное устройство в положение «сброс», одновременно выключив секундомер.
7. Регулируя расход воды краном 5, или изменяя глубину в нижнем бьефе шандорами 7, установить режим отогнанного гидравлического прыжка.
8. Определить отметку свободной поверхности перед прыжком $\nabla_{п1}$, за прыжком $\nabla_{п2}$, длину прыжка $L_{пр}$.
9. Провести замеры в соответствии с пунктами 4 - 6.
10. Измерить среднюю скорость потока в прыжке анемометром.
11. Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1- Данные измерений.

Ширина водослива $b =$ м; Объем мерного сосуда $S =$ м²; Отметка дна лотка $\nabla_{дн} =$ м.

№ опыта	Отметка воды перед прыжком $\nabla_{п1}, \text{М}$	Отметка воды за прыжком $\nabla_{п2}, \text{М}$	Длина прыжка $L_{пр}, \text{м}$	Объем воды в мерном сосуде $W, \text{м}^3$	Время заполнения мерного сосуда $t, \text{сек}$	Расход воды $Q, \text{м}^3/\text{с}$	Скорость потока в прыжке. $V, \text{м/с}$
1							
.....							

Данные обработки результатов измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2- Результаты расчетов.

№ опыта	h_1 м опыт	h_2 м опыт	$a, \text{м}$ опыт	$h_{кр}, \text{М}$	h_2 м расчет по (6)	$L_{пр}, \text{м}$ по (7)	$\Delta E, \text{м}$ по(8)	$\Delta E = \frac{\alpha V^2}{2g}$ м
1								
3								

Для каждого опыта вычислить:

- расход воды: $Q = W/t$

- глубину потока перед прыжком: $h_1 = \nabla_{п1} - \nabla_{дн}$

-глубину потока за прыжком: $h_2 = \nabla_{п2} - \nabla_{дн}$

-высоту прыжка: $a = h_2 - h_1$., критическую глубину: $h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}$

- вторую сопряженную глубину h_2 по формуле (6): считая первой сопряженной глубиной опытное значение h_1 .

- длину гидравлического прыжка $L_{пр}$ по формуле (7).

-энергию прыжка ΔE по формуле (8).

-энергию прыжка по данным измерений скорости с использованием формулы

$$\Delta E = \frac{\alpha V^2}{2g} .$$

Сопоставить опытные и рассчитанные значения второй сопряженной глубины и длины гидравлического прыжка и энергии прыжка. Результаты вычислений представляются в таблице 2 .

Контрольные вопросы

1. Что называется гидравлическим прыжком? Нарисуйте схему прыжка. Объясните причину его возникновения. Что такое совершенный гидравлический прыжок, когда он возникает?
2. Дайте определение основных характеристик гидравлического прыжка: сопряженных глубин, высоты и длины прыжка..
3. Что такое прыжковая функция и каков ее смысл?
4. Что такое раздельная глубина? При каком соотношении раздельной и глубины потока в отводящем русле прыжок является отогнанным и надвинутым?
5. Покажите на графике изменение прыжковой функции и полной удельной энергии прыжка с глубиной воды. При какой глубине прыжковой функция и полная удельная энергия имеет минимум?

Рекомендуемая литература

1. Нигматулин Р.И., Соловьёв А.А. Основы гидромеханики. М., ЛИТТЕРРА, 2012.

Лабораторная работа №11

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЗАМКНУТОЙ АКВАТОРИИ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ПРОФИЛЕ ВЕТРА НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Зайцев С.И., Киселева С.В.

Цель работы: Ознакомление с эффектом воздействия неравномерного ветра на развитие циркуляционных течений на водной поверхности

Задача работы: Экспериментальная проверка условий возникновения компенсационных противотечений.

Принадлежности: Анемометр с цифровой индикацией; индикаторы движения воды на различной глубине водного слоя; секундомер; линейка; фотоаппарат с видеокамерой.

Описание явления

Сгонно-нагонный эффект и связанный с ним наклон поверхности моря в направлении, обратном ветру, в замкнутых водоемах морского типа хорошо известен. Однако, механизм ветрового нагона в замкнутом море небольшой глубины, мало подверженном влиянию вращения Земли, является достаточно сложным. Тем не менее, можно в общих чертах установить основные характерные особенности циркуляции, возбуждаемой ветром в замкнутом море, когда компонентами силы Кориолиса можно пренебречь в сравнении с компонентами сил трения, возникающими в вязкой жидкости.

Вследствие вязкости поверхностный слой моря увлекается в направлении действующей силы (тангенциальное давление ветра), что приводит к накоплению жидкости у наветренного берега («подпор») и, следовательно, к наклону поверхности моря. Возникающий при этом градиент давления, направленный в сторону, противоположную ветру, обуславливает в свою очередь глубинное течение, направленное в придонном слое против ветра и компенсирующее непрерывный приток воды у наветренного берега в поверхностном слое моря.

Рассмотрим замкнутый бассейн постоянной глубины h и наполненный однородной жидкостью плотности ρ . Начало прямоугольной системы координат x

совместим с невозмущенной горизонтальной свободной поверхностью жидкости в бассейне. Ось z направим вниз. Если отклоняющая сила вращения Земли отсутствует, то стационарная циркуляция воды в бассейне будет описываться следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{m}{r} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial x} &= u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z}, \\ g - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{m}{r} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) &= u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и уравнением неразрывности, которое применительно к рассматриваемому движению имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где через u и w обозначены компоненты скорости в направлении осей x и z соответственно, g - ускорение силы тяжести, p - давление, μ - коэффициент турбулентного внутреннего трения, величина которого предполагается постоянной, ρ - неизменяющаяся плотность жидкости.

Если заранее условиться, что продольные размеры бассейна L (направление x) велики и намного превышают его глубину ($\frac{L}{h} = 10^6 - 10^5$), что обычно имеет место в природных условиях, то всеми членами, содержащими вертикальную компоненту скорости w , можно будет пренебречь в центральных областях бассейна (рисунок 1).

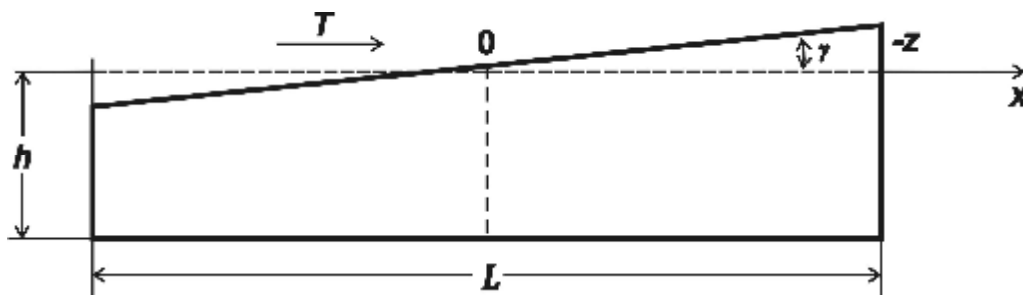


Рисунок 1 – Схема изменения уровня воды при однородном ветре над поверхностью бассейна

Равным образом при сделанных допущениях можно пренебречь и членами $u \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{m}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$. Граничным условием на свободной поверхности в центре бассейна ($z=0$) будет равенство напряжений

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} = -\frac{T}{m}, \quad (3)$$

где через T обозначено тангенциальное давление (напряжение) ветра на поверхности воды в бассейне. Это условие, верное, строго говоря, для горизонтальной свободной поверхности, принимается приближенно и для поверхности, обладающей наклоном, поскольку угол наклона γ , как указывалось ранее, чрезвычайно мал.

В качестве второго условия потребуем, чтобы скорость течения обращалась в нуль на дне бассейна (условие прилипания):

$$(u)_{z=h} = 0. \quad (4)$$

В соответствии с граничными условиями (3) и (4), распределение горизонтальной компоненты скорости течения по вертикали, в удалении от продольных границ бассейна, будет определяться выражением:

$$u = \frac{grtg\gamma}{2m}(h^2 - z^2) + \frac{T}{m}(h - z). \quad (5)$$

Выразим теперь постоянную величину $tg\gamma$ в зависимости от тангенциального давления ветра. Заметим, что в замкнутом водоеме рассматриваемого типа при условии $\gamma = const$ полный расход через любую вертикаль должен равняться нулю. Иначе говоря,

$$\int_0^h u dz = 0 \quad (6)$$

Интегрирование u по z в пределах $z=0$ до $z=h$ дает:

$$tg\gamma = -\frac{3T}{2grh} \quad (7)$$

Это соотношение было получено Экманом, который воспользовался им для определения зависимости между скоростью ветра и его тангенциальным давлением на поверхность моря.

Подстановка выражения (7) в уравнение (5) дает:

$$u = -\frac{3T}{4mh}(h^2 - z^2) + \frac{T}{m}(h - z). \quad (8)$$

Приравнивая правую часть (8) нулю и решая полученное таким образом уравнение относительно z , найдем, что скорость течения обращается в нуль не только на дне бассейна, но и на одной трети глубины от поверхности. В слое от $z = \frac{h}{3}$ до $z = h$ имеет место течение, направленное в сторону, противоположную ветру, и компенсирующее, согласно условию (6), нагонное течение, существующее в слое от поверхности до $z = \frac{h}{3}$ (Рис.2). При этом, как легко убедиться из соотношения (8), скорость течения на поверхности определяется величиной

$$u_0 = \frac{Th}{4m} \quad (9)$$

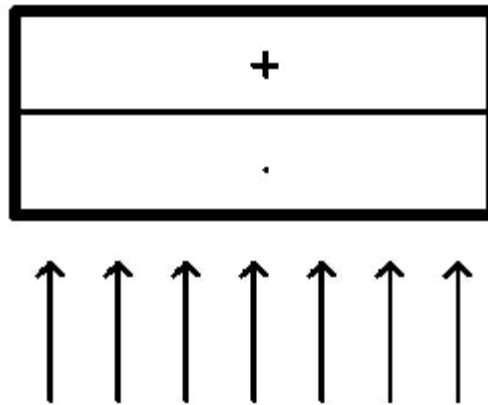


Рисунок 2 – Однородный профиль ветра над поверхностью (стрелки одинаковой длины). В жидкости возникает вертикальная циркуляция (+ - движение воды от наблюдателя, - к наблюдателю).

Рассматривая стационарную циркуляцию, возбуждаемую ветром в замкнутом однородном море, В.Б.Штокман путем приближенного анализа явления показал, что поперечная неравномерность скорости ветра (одного и того же направления) приводит в результате к циркуляции не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскостях; таким образом, на поверхности моря могут существовать компенсационные течения, направленные обратно ветру (рисунок 3). В.Б.Штокман пытался развить идею о роли поперечной неравномерности нагонного ветра в горизонтальной циркуляции, существующей в мелководных замкнутых морях, больших заливах и в экваториальных областях океана.

Для решения вопроса в самом первом приближении В.Б.Штокман пренебрегает в уравнениях движения инерционными членами и эффектом вращения Земли и рассматривает, опуская условия на боковых границах, лишь продольные (в направлении ветра) компоненты скорости течения в бассейне постоянной глубины H . Если иметь в виду, что в реальных условиях горизонтальные размеры морских бассейнов намного превышают их глубину, то, вертикальными составляющими течения можно пренебрегать практически на всем протяжении бассейна и приближенно описывать стационарное движение в направлении ветра одним уравнением:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + g r t g g = 0 \quad (10)$$

с граничными условиями

$$m \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} = -T(y); \quad (u)_{z=h} = 0. \quad (11)$$

где $T(y)$ – тангенциальное давление ветра на поверхности воды, меняющееся в поперечном направлении ветра (ось y) по любому заданному закону.

При таких условиях решение (10) представится в виде

$$u = \frac{g r t g g}{2m} (h^2 - z^2) + \frac{T(y)}{m} (h - z). \quad (12)$$

причем константы интегрирования уравнения могут быть определены из условий (11).

Для определения tgy следует исходить из дополнительного условия, согласно которому при стационарном наклоне уровенной поверхности полное количество жидкости, протекающее через поперечное сечение бассейна, должно равняться нулю:

$$\int_0^l \int_0^h u dz dy = 0,$$

где l - поперечные размеры бассейна. При этом условии

$$t g g = -\frac{3}{4 g r h} \frac{1}{l} \int_0^l T(y) dy \quad (13)$$

Но $\frac{1}{l} \int_0^l T(y) dy = \bar{T}$, и выражение (12) переписется в следующем виде:

$$u = \frac{(h-z)}{m} \left[T(y) - \frac{3\bar{T}(h+z)}{4h} \right]. \quad (14)$$

Откуда следует, что противотечение ($u < 0$) на поверхности ($z=0$) возможно при условии $\frac{\bar{T}}{T} \geq 1,33$. Таким образом, даже при небольшой неравномерности ветра возникает противотечение.

Из (14) легко получить уравнение нулевой изотакхи ($u=0$), разграничивающей в вертикальной плоскости поперечного сечения бассейна нагонный поток и компенсационное противотечение. Это уравнение имеет вид

$$z = \frac{h}{3\bar{T}} [4T(y) - 3\bar{T}]. \quad (15)$$

Из (15), следует, что в случае равномерного ветра, когда $T(y) = \bar{T} = const$, граница раздела является прямой, параллельной y , и расположена на расстоянии от поверхности, равном одной трети глубины ($z = \frac{h}{3}$).

Если тангенциальное давление меняется по линейному закону $T(y) = my + k$, то глубина, на которой возникает компенсационное противотечение, определяется из соотношения

$$z = \frac{h[2k + m(8y - 3l)]}{3(ml + 2k)} \quad (16)$$

откуда видно, что глубина эта меняется по ширине потока и зависит от начальной скорости ветра [$T(y)$ при $y=0$] и возрастания скорости его в направлении оси y . В том случае, когда $m=0$ (поле ветра равномерно), глубина, на которой возникает противотечение, равна той, которая была получена выше ($z = \frac{h}{3}$ Рисунок 2).

Рисунок 3 иллюстрирует положение границы противотечения в поперечном сечении бассейна, соответствующее определенному характеру линейного возрастания скорости ветра от левого к правому «берегу» бассейна. Направление ветра на этом рисунке соответствует направлению перпендикуляра, опущенного на плоскость чертежа. Знаком плюс обозначены области потока, где течение направлено по ветру, а знаком минус - течение обратного направления.

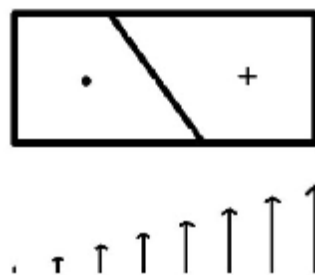


Рисунок 3 – Граница противотечения при неоднородном профиле ветра над поверхностью замкнутого бассейна

Как видно из рисунка 3, при $m=1$, когда скорость ветра резко возрастает от левого к правому «берегу» бассейна ($T=y+0,1$), граница между нагонным течением, направленным по ветру, и компенсационным потоком в противоположном направлении располагается почти отвесно. В области поперечного сечения бассейна, примыкающей к левому «берегу», течение направлено против ветра во всей толще жидкого слоя от поверхности до дна бассейна, а нагонное течение прижато к правому «берегу».

Центр замкнутой циркуляции, существующей в данном случае на поверхности воды в бассейне (рисунок 4), сдвинут по отношению к середине поперечного сечения бассейна ближе к левому «берегу».

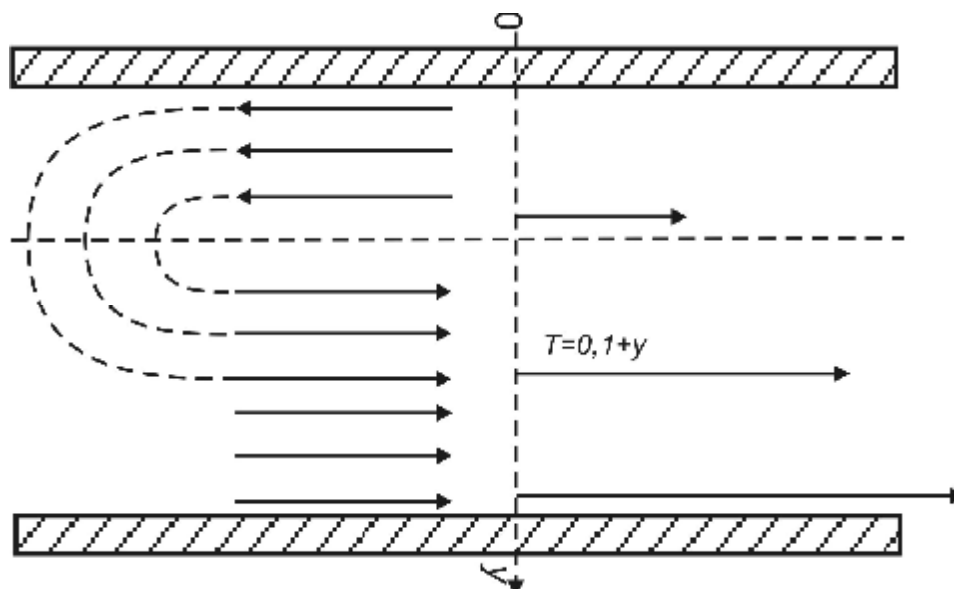


Рисунок 4 – Схема циркуляции на поверхности воды (слева) и профиль скорости ветра (справа)

Из уравнения (15) следует также, что в общем случае наклон границы раздела (по отношению к горизонтальной оси Y) в некоторой точке (z,y) внутри бассейна определяется выражением

$$tga = -\frac{dz}{dy} = -\frac{4hdT}{3\bar{T}dy} = -\frac{2,67hW}{\bar{W}} \frac{dW}{dy} \quad (17)$$

где W – скорость ветра. Отсюда видно, что граница раздела обладает наклоном, обратным наклону кривой поперечного изменения скорости ветра; другими словами, зеркально копирует, но в ином масштабе, кривую поперечного изменения скорости ветра. Величина tga до некоторой степени является качественным мериллом отношения между поперечной ветру горизонтальной компонентой скорости u и вертикальной компонентой скорости w движения воды в бассейне. Очевидно, что в предельном случае, когда $tga = 0$, $u = 0$, и, наоборот, когда $tga = \infty$, $w = 0$. Из (15) поэтому следует, что при неизменной средней квадратичной скорости ветра отношение $\frac{u}{w}$ возрастает либо с увеличением глубины бассейна, либо с увеличением скорости ветра и ее поперечного градиента.

Определение границ раздела между течениями, направленными по ветру и против ветра (в вертикальной плоскости поперечного ветру сечения бассейна), может быть осуществлено весьма быстро очень простым приемом, вытекающим из указанного здесь приближенного анализа явления.

Для этой цели уравнение (15) удобнее представить иначе, а именно:

$$T(y) = \frac{3\bar{T}}{4} \left(1 + \frac{z}{h}\right),$$

Или, используя зависимость $T = r'kW^2$ можно записать так:

$$W^2(y) = \frac{3\bar{W}^2}{4} \left(1 + \frac{z}{h}\right). \quad (18)$$

где r' - плотность воздуха, k — постоянный коэффициент, W — скорость ветра.

Рисунок 5 служит образцом указанных построений. В верхней части пунктиром изображено поперечное изменение скорости ветра $W(y)$, направленного перпендикулярно чертежу, а сплошной кривой - изменение квадратов скорости ветра $W^2(y)$. В нижней части намечены контуры поперечного вертикального сечения бассейна и нанесены границы между течением, направленным по ветру (+), и

компенсационным (-) противотечением. Наконец, штрихами с пунктиром обозначено положение максимума скоростей противотечения, который в данном случае всюду находится ниже поверхности воды в бассейне.

Столь же легко наметить границы противотечения в особо интересном случае, когда скорость нагонного ветра резко уменьшается в узкой центральной области бассейна, тогда как за пределами этой области она постоянна (рисунок б). Подобного рода характер поперечной неравномерности нагонного ветра напоминает условия, встречающиеся в экваториальной области Тихого океана, где в основном равномерная скорость пассатов, нагоняющих воду в западную часть океана, резко снижается до нуля в узкой штилевой полосе, расположенной к северу от экватора.

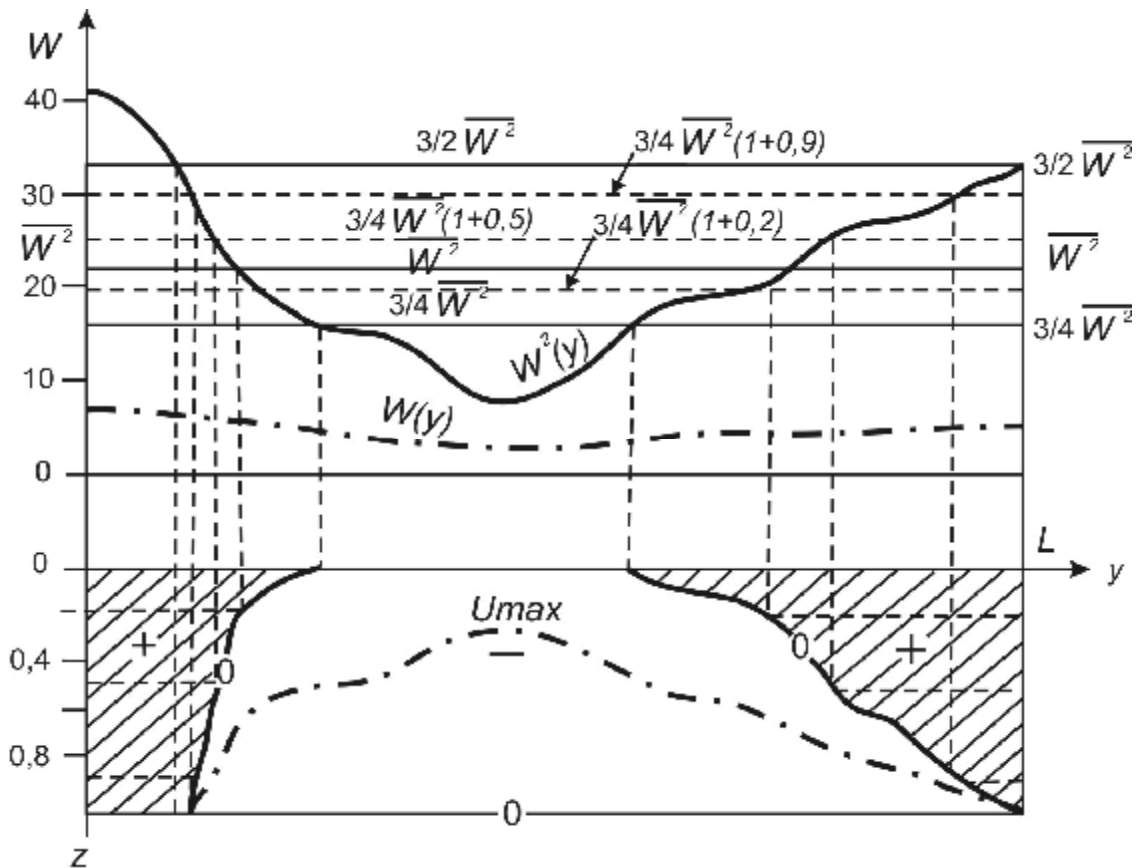


Рисунок 5 – Распределение скорости ветра над бассейном и направления течений в толще воды в экспериментальном бассейне.

Однако для построения полной, хотя бы и приближенной, теории экваториальных противотечений, В.Б.Штокману необходимо учесть эффект отклоняющей силы вращения Земли, что и было сделано в работе [2]. В результате такого раз-

вития теории стало возможным получение поперечного ветру профиля поверхности океана (рис.7).

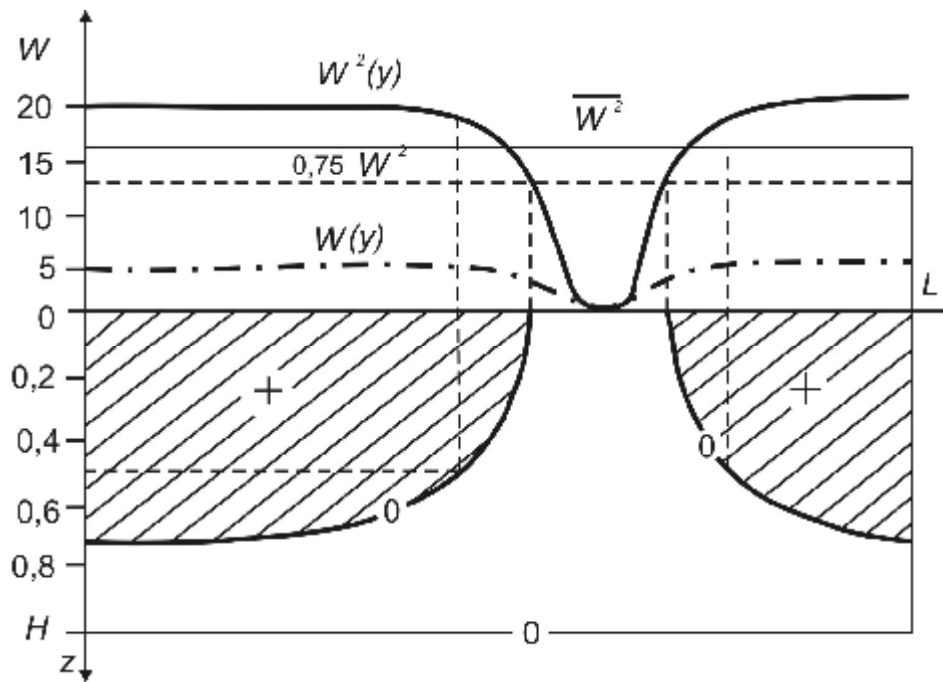


Рисунок 6 – Распределение скоростей ветра в области противотечений.

Этот профиль, как показывают наблюдения в Тихом океане на меридиональном разрезе, перпендикулярном экваториальным потокам, находится в соответствии с направлением и скоростями потоков в поле кориолисовой силы. Пунктиром на рис. 7 обозначен наклон поверхности в том случае, если бы вся система находилась в северном полушарии.

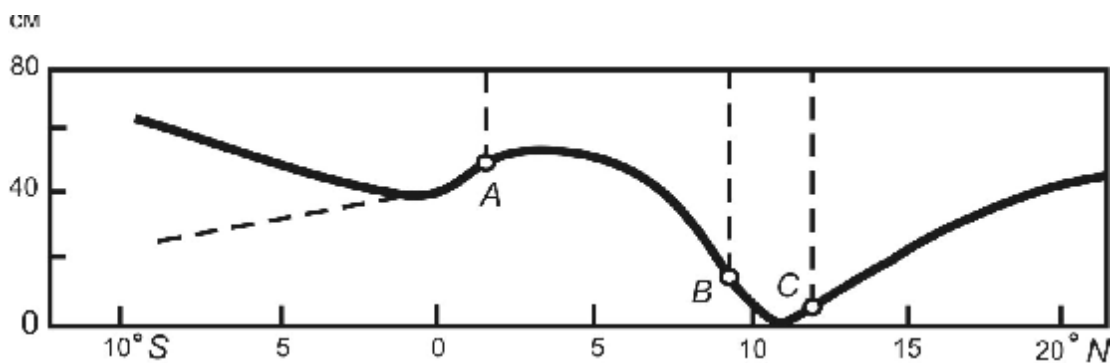


Рисунок 7 – Профиль уровня поверхности океана

Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований системы течений, возникающих в модельной акватории под воздействием ветра, предназначена лабо-

раторная установка, состоящая из резервуара прямоугольной формы (характерные размеры (длина, ширина, глубина жидкости): $L=100\text{см}$, $l=50\text{см}$, $0 < h < 10\text{см}$; системы нагнетания воздуха, позволяющего создавать потоки различных направлений, в том числе встречные, и системы визуализации движений в водной среде (рисунок 8). Технические средства позволяли создавать воздушные потоки над поверхностью с неоднородным профилем скорости и диапазоном изменений от 0 до 15 м/с. Скорости течений на поверхности и в толще жидкости возможно фиксировать с помощью видео визуализации движения частиц-маркеров нейтральной плавучести, а так же систем индикаторов движения, расположенных на различных глубинах в резервуаре.

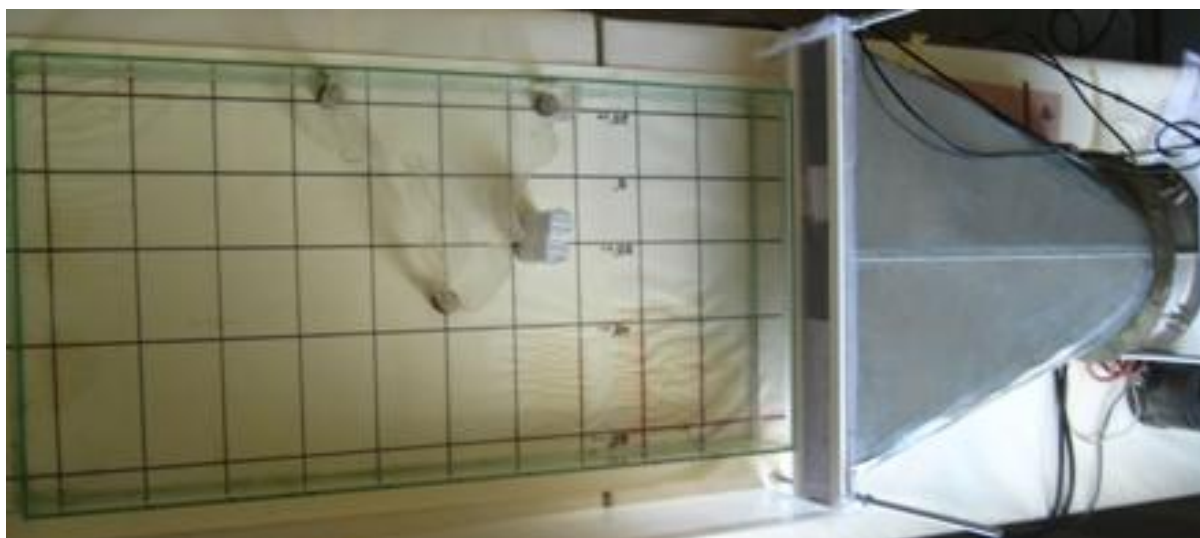


Рисунок 8 – Экспериментальная установка (вид сверху).

Порядок проведения работы

Задание №1. Изучение квазиравномерного профиля ветра.

Установите однородный рассеиватель в раструбе нагнетателя воздуха для создания квазиравномерного профиля ветра. Включите вентилятор и с помощью анемометра проведите измерения скорости ветра на расстояниях 10, 20, 30, 40, 50, 60 см от наветренного края установки. Постройте профили скорости ветра над поверхностью воды, сделайте вывод. Используя частицы трассера (обработанные семена розмарина) проведите визуализацию и запись изображения поверхностного течения с помощью видеокамеры. Какие особенности течения отражают непостоянство скорости ветра по профилю? Определите по видеозаписи

характерные скорости движения поверхностных слоев воды в направлении по ветру и в противоположном направлении.

Задание №2. Изучение квазиравномерного профиля ветра

Установите неоднородный рассеиватель в раструбе воздухонагнетателя для создания градиентного профиля ветра. Включите вентилятор и с помощью анемометра проведите измерения скорости ветра на расстояниях 10, 20, 30, 40, 50, 60 см от наветренного края установки. Постройте профили скорости ветра над поверхностью воды. Проведите аппроксимацию профилей ветра линейной зависимостью, определите коэффициенты линейной зависимости ($V = my+k$). Используя частицы трассера, проведите визуализацию и запись изображения поверхностного течения с помощью видеокамеры.

Определите: форму зависимости глубины, на которой возникает компенсационное течение, и построьте график этой зависимости в соответствии

$z = \frac{h[2k + m(8y - 3l)]}{3(ml + 2k)}$. По видеокартине оцените ширину прямого и компенсационного течения на поверхности воды в установке.

Контрольные вопросы

1. Сравните особенности движения жидкости при равномерном и неравномерном профиле скорости ветра над поверхностью.

2. Опишите гипотезу Б.В.Штокмана о роли неравномерности профиля ветра в формировании экваториальных противотечений.

Рекомендуемая литература

1. В.Б. Штокман. Ветровой нагон и горизонтальная циркуляция в замкнутом море небольшой глубины. В кн.: Избранные труды по физике моря. Л.: Гидрометеиздат, 1970, С. 173-197.

2. В.Б. Штокман Теория экваториальных противотечений в океанах. Там же.

Лабораторная работа №12

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Соловьев А.А.

Цель работы: Визуальное наблюдение за термобарическими течениями. Определение термических и динамических характеристик термобарических течений

Задача работы: опытное определение распределения температуры на фронте термобара и скорости перемещения его фронта.

Принадлежности: 1) опытная установка; 2) Ртутный термометр 3) Весы 4) Линейка. 5) Кристаллы марганцево-кислого калия. 6) Трассеры скорости (шарики пенопласта). 7) Лед.

Описание явления

Изучение процессов конвекции, вносящих существенный вклад в тепловой баланс океанов, морей, озер, естественных и искусственных водоемов, вызывает постоянно возрастающий научный и практический интерес. К числу явлений, знание закономерностей которых необходимо для построения общей теории взаимодействия океана и атмосферы, а также прогноза термического и динамического режима озер и водохранилищ, относится плотностное перемешивание вод с образованием фронтального раздела - термического бара (термобара). Термический бар формируется в пресных и солоноватых водоемах ($S \leq 24\text{‰}$) средних широт в период освобождения от ледяного покрова, либо его образования. В весенний период, прогрев прибрежной области водоема под действием солнечного излучения идет интенсивнее, чем центральной. В том случае, когда поверхностные воды прибрежной области быстрее достигают температуры максимальной плотности близкой к 4°C , возникает неустойчивость плотностной стратификации, вызывающая конвективное перемешивание. Конвективное движение вод прибрежной и центральной части водоема приводит к формированию узкого вертикального слоя, фронтально разделяющего водоем на две области с разной температурой и скоростью. Аналогичная ситуация также имеет место в период осеннего охлаждения водоема.

Лабораторная установка

Для экспериментального моделирования термического бара создана лабораторная установка. Она представляет собой прямоугольный бассейн из стекла длиной $l = 1,5$ м и шириной $n = 0,4$ м с наклонным в продольном направлении дном (рисунки 1,2.). Угол наклона дна можно было изменять в пределах от 0 до 15 градусов. Дно смонтировано так, что залитая в бассейн вода образует клин. Его толщина, т. е. глубина бассейна равномерно нарастает в продольном направлении до заданного уровня h_w . Для уменьшения теплоотдачи через дно и стенки бассейн изолирован термофольгой и пенопластом.

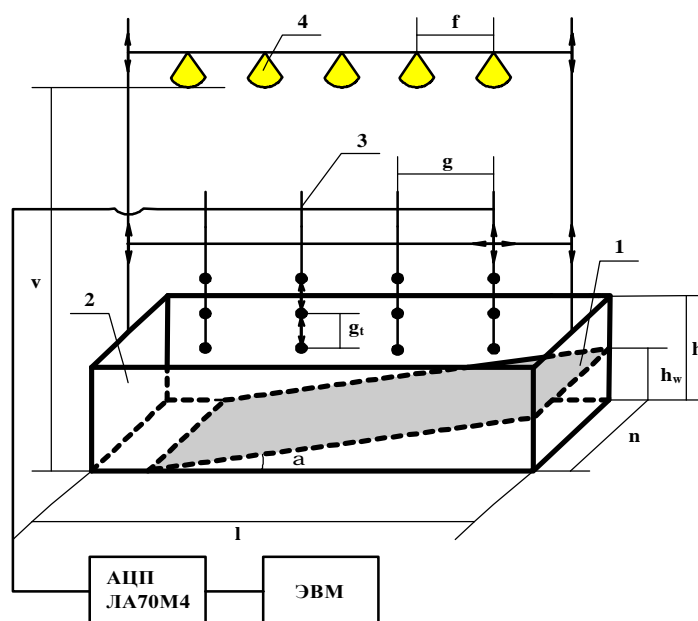


Рисунок 1- Схема лабораторной установки. Обозначения: l – длина основания бассейна 1,5 м, α – угол наклона дна, n – ширина бассейна 0,4 м, h – глубина бассейна 0,4 м, h_w – глубина воды, v – высота подвеса электроламп, f – изменяемое расстояние между электролампами, g – изменяемое расстояние между вертикальными зондами с термодатчиками, g_t – изменяемое расстояние между термодатчиками на вертикальном зонде, 1 – наклонное дно (клин), 2 – прозрачная наблюдательная стенка, 3 – вертикальные зонды с термодатчиками, 4 – электролампы накаливания.

Перед началом каждого опыта бассейн наполняется водопроводной водой с температурой около 10°C . Затем в бассейн добавляется лед, по мере таяния которого температура воды понижается до величины $T_0 < T_m$ ($T_m = 4^{\circ}\text{C}$). Масса льда, необходимого для достижения значения начальной температуры T_0 рассчитыва-

ется по формуле: $m_1 = \frac{cm_2\Delta t}{\lambda}$, где m_1 – масса льда, m_2 – масса воды в бассейне, c – удельная теплоемкость воды, Δt – изменение температуры, λ – удельная теплота плавления льда, Для экспериментов масса льда должна быть 8 - 10 кг. Для выравнивания температурных неоднородностей вода в бассейне перемешивается, а перед началом прогрева несколько минут отстаивается.

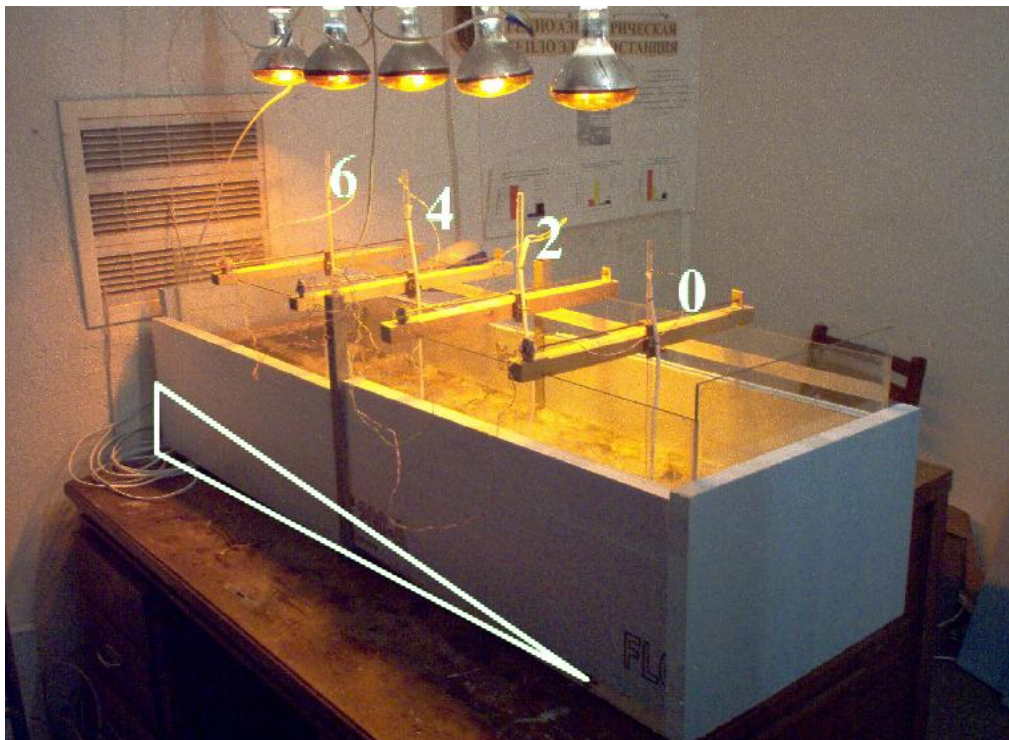


Рисунок 2- Фотография лабораторной установки.

Здесь 0, 2, 4, 6 – номера измерительных зондов. Схематически показано положение наклонного дна.

Поток тепла на водную поверхность создается электрическими лампами. На специальной стойке установки установлено пять электроламп ИКЗ-250 номинальной мощностью 250 Вт. Лампы размещаются равномерно вдоль бассейна над поверхностью воды на заданном расстоянии от основания бассейна $h = 0,4$ м. С целью изменений условий прогрева напряжение тока в цепи источников света и расстояние h от опыта к опыту можно изменять в заданных пределах. Это дает возможность варьировать поток тепла на водную поверхность Q в диапазоне $(1 \cdot 10^{-3} — 5 \cdot 10^{-3})$ кал·/см² с.

Для измерения потока тепла используется цифровой люксметр, позволяющий получать значения с точностью до $\pm 2\%$. Температура воды измеряется с помощью четырех вертикальных зондов, с закрепленными на них полупроводниковыми интегральными микросхемами К1019ЕМ1 (датчиками температуры) (рисунок 3.). Эти микросхемы представляют собой термодатчики с линейной зависимостью выходного напряжения от температуры. Они предназначены для работы в устройствах контроля, измерения и регулирования температуры. Микросхемы оформлены в металлокерамическом корпусе КТ-1-9 с гибкими проволочными лужеными выводами (рис. 3.); масса прибора - не более 1,5г.

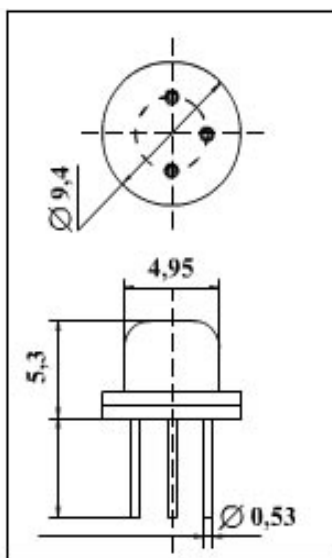


Рисунок 3. Датчик температуры К1019ЕМ1

Таблица 1. Основные электрические характеристики датчика температуры К1019ЕМ1

Характеристика	Значение
Ток питания, мА	1
Выходное напряжение, мВ, при токе питания 1 мА и температуре 298К (25°C)	2952...3012
398К (125°C)	3932...4032
263К (-1°C)	2582.. 2682
228К (-45°C)	2232...2332
Рабочий температурный интервал, °С	-45...+ 125

Датчик по свойствам подобен стабилитрону с малым дифференциальным сопротивлением и со стабильным и нормированным плюсовым температурным коэффициентом напряжения. Принцип работы датчика определяется свойством р-п-перехода, которое заключается в том, что падение напряжения на выходных клеммах датчика линейно зависит от его температуры. Причем, температурный коэффициент напряжения р-п-перехода отрицателен и имеет универсальное значение $2 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$. Основные электрические характеристики датчика, приведены в таблице 1.

Отдельный датчик установлен над поверхностью воды для регистрации температуры воздуха. Абсолютная погрешность измерения температуры составляет не более 0.15°С . Сигналы датчиков с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) заводской платы ЛА70М4, подаются на шину ISA-8 компьютера ПЭВМ IBM PC и после обработки программой - интерпретатором выдаются на устройство хранения данных жесткого диска компьютера (HDD) в виде массива значений температур с заданной дискретностью.

Измерения проводятся на продольном разрезе, проходящем посередине бассейна. Расстояние между соседними точками, в которых выполнялось измерение, устанавливалось для горизонтально однородных по температуре областей с шагом от 10 до 20 см, а в зоне фронта термического бара в интервале от 0,5 до 2,5 см. Наряду с измерениями температуры проводятся визуальные наблюдения за циркуляцией в бассейне (видео и фотосъемка). В качестве трассеров использовались кристаллы марганцево-кислого калия, которые, оседая, оставляли в толще воды тонкие следы, искривлявшиеся под влиянием течений.

Правильность показаний термодатчиков К1019ЕМ1, контролируется с помощью инфракрасного дистанционного измерителя температуры. Наклон дна под углом к горизонту $\alpha = 5-6^\circ$ характерен для большинства озер. В лабораторных экспериментах при таком угле наклона изменение глубины воды по длине бассейна начиналось приблизительно от 1 см воды в мелком конце клина и заканчивалось 15 см в глубоком конце. Скорость лабораторного нагревания воды незначительно отличается от типичных значений солнечной радиации в натур-

ных условиях, например весеннего нагрева с интенсивностью $7 \cdot 10^{-3}$ кал /см² с на озере Онтарио [1].

Таблица 2. Критерии гидродинамического подобия.

Критерий подобия	Озеро	Лабораторный бассейн
Число Рейнольдса: $Re = \frac{UL}{\nu}$	$3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^3$
Число Фруда: $Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$

В лабораторном бассейне основное количество теплоты поглощалось верхним сантиметровым слоем воды. Этот элемент лабораторного эксперимента имитирует солнечное поглощение тепла в верхнем метровом слое в озере. Что касается пространственных масштабов лабораторного бассейна по сравнению с реальным водоемом, то по вертикали реализуется пропорциональное уменьшение размеров в соотношении 1:1000. При наклоне дна $\alpha = 6^\circ$, по горизонтали масштаб лабораторного «озера» снижался в соотношении 1:20000 по сравнению, например, с озером Онтарио [1]. Лабораторный бассейн в разрезе можно рассматривать соответствующим сечению от берега до центра озера. Значения критериев гидродинамического подобия для лабораторного бассейна и природного озера длиной $L = 1000$ м приведены в таблице 2. В качестве характерной скорости движения водных масс в озере U в расчетах, использованы данные работы [2].

Порядок проведения эксперимента

1. С помощью ртутного термометра провести измерения температуры воздуха на высоте 5 см. над поверхностью воды и температуры воды в лабораторном бассейне.
2. Линейкой измерить глубину воды в бассейне и определить угол наклона дна.

3. Рассчитать массу воды в бассейне. Определить массу льда, необходимого для достижения значения начальной температуры T_0 по формуле: $m_1 = \frac{cm_2\Delta t}{\lambda}$, где m_1 – масса льда, m_2 – масса воды в бассейне, c – удельная теплоемкость воды, Δt – изменение температуры, λ – удельная теплота плавления льда.

Таблица 3. Результаты измерений.

	начальные значения (до добавления льда)	конечные значения (после добавления льда)
$T_{\text{возд.}}, ^\circ\text{C}$		
$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$		
$\Delta t, ^\circ\text{C}$		
$m_1, \text{кг}$		
$m_2, \text{кг}$		
$h_w, \text{м}$		
$\alpha, \text{град.}$		

4. Взвесить и добавить нужное количество льда в бассейн проводя непрерывное перемешивание.

5. Провести перемешивание воды для выравнивания температурных неоднородностей и затем добавить лед. Используя ртутный термометр убедится, что температура воды понизилась до $T_0 < T_m$ ($T_m = 4 ^\circ\text{C}$). Данные измерений записать в таблицу 3.

6. Произвести включение электроламп накаливания и датчиков температуры, сопряженных с ПЭВМ.

7. Запустить программу ЛА-70 в режиме записи температуры в файл и зафиксировать время начала эксперимента. Через 15 - 20 мин. после включения ламп провести наблюдения за перемещениями трассерами (кристаллами марганцево-кислого калия) на водной поверхности (рисунок 4).

8. Оценить с помощью измерительной шкалы, скорости движения водных масс

на поверхности (шариков пенопласта) и в циркуляционных ячейках (кристаллы марганцовки).

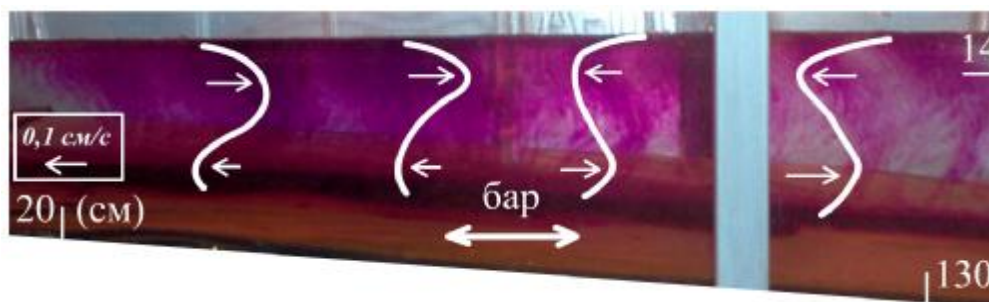


Рисунок 4 -Визуализация течений в лабораторном бассейне слева и справа от гидрофронта в момент времени $t = 2 \cdot 10^3$ с. Линиями показаны профили горизонтальной скорости (траектории оседания кристаллов марганцево-кислого калия).

9. Определить расположение фронта термобара. Измерить ширину переходной зоны между циркуляционными ячейками. В заключительной фазе эксперимента (через 40-60 мин), наблюдать смещения и искривление фронта термобара.

10. Записать данные измерений температуры на ПЭВМ в файл и зафиксировать время конца эксперимента.

Таблица 4. Сравнительный расчет характеристик термобара

Тип водоема:	Характерная скорость движения водных масс на поверхности U , м/с	Число Рейнольдса: $Re = \frac{UL}{\nu}$	Число Фруда: $Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$
Лабораторный бассейн			
Природный водоем (название)			

11. Построить в программе Microsoft Excel график зависимости температуры воды от времени прогрева в четырех фиксированных точках (данные с четырех датчиков), расположенных по длине бассейна. По графику определить время существования 4-х градусной изотермы (термобара) и скорость ее смещения между 1 и 4 термодатчиком.

12. Данные измерений скорости записать в Таблицу 4. Рассчитать значения чисел Рейнольдса и Фруда и занести их в Таблицу 4. Сравнить полученные значения со значениями аналогичных параметров для природных водоемов (самостоятельно выбрать водоем).

Контрольные вопросы

1. Дайте определение явления термобарического бара.
2. При каких условиях возникает весенний и осенний термобар.
3. Почему термобар возникает тогда, когда температура воды достигает значений 4°C ?
4. Какими критериями подобия характеризуются явления термобара в натуральных и лабораторных условиях наблюдения?

Рекомендуемая литература

1. Показеев К.В. Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер М.: МГУ, 2002. 276 с.
2. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. // Л.: Наука, 1982. 232 с.

Лабораторная работа №13

ЛАМИНАРНЫЙ И ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

С.И. Зайцев

Цель работы: Изучение условий возникновения двух режимов течения жидкостей (ламинарный и турбулентный)

Задача работы: Определение критерия перехода от ламинарного течения к турбулентному.

Принадлежности: Экспериментальная установка, чернила (индикатор характера движения жидкости), мерная емкость, секундомер, термометр, линейка, фотоаппарат.

Описание явления

Структура движения частиц в потоках жидкости имеет две характерные разновидности. При определенных условиях движение частиц в потоках происходит без перемешивания по непересекающимся траекториям вдоль линий тока.

Такой регулярный характер движения является, как будто пластинчатым или слоистым и поэтому был назван ламинарным (lamina – пластина). В то же время при определенных условиях движение частиц жидкости может характеризоваться беспорядочными завихренными траекториями с движением частиц во всевозможных направлениях. При этом помимо переносного движения по направлению потока, жидкие частицы совершают нерегулярные пространственные колебания, приводящие к перемещениям по пересекающимся траекториям с перемешиванием. Этот режим течения получил название турбулентный (turbulentos – беспорядочный).

Определение условий, приводящих к смене режимов течения, имеет принципиальное значения для решения как фундаментальных проблем движения в жидкости и газе, так и прикладных задач гидромеханики. Это связано с тем, что характеристики потоков, потери на трение, теплопередача и др. параметры существенно отличаются при двух режимах движения.

Один из подходов к рассмотрению природы турбулентных течений связан с представлением турбулентности как процесса развития неустойчивости гидродинамических движений. Ламинарный режим течения характеризуется тем, что возмущения малой амплитуды, которые возникают в потоке по тем или иным причинам затухают со временем. И поэтому движение жидких частиц остается слоистым, полностью взаимно подобным. Напротив, в турбулентных потоках неизбежно возникающие возмущения обладают тенденцией к разрастанию. В результате чего характер движения жидких частиц приобретает беспорядочную хаотическую форму. В рамках представлений о турбулентности как течений с развитой неустойчивостью был проведен анализ на устойчивость потоков идеальной несжимаемой жидкости, находящейся в поле силы тяжести. Результаты анализа показали, что начало неустойчивости течений, характеризуется минимальным критическим числом Рейнольдса $Re_{кр}$. Число Рейнольдса представляет собой безразмерный комплекс, который определяет соотношение сил инерции и сил вязкости. Для течений он имеет вид: $Re = \frac{\rho V h}{\eta}$, где ρ – плотность жидкости, η

- динамическая вязкость, h - характерный размер потока жидкости (например, толщина слоя жидкости), V - средняя скорость движения жидкости в потоке.

Немаловажное значение в практическом определении чисел Рейнольдса имеет вязкость. Вязкость жидкости определяют как степень ее сопротивляемости сдвигающим усилиям. При течении жидкости между ее отдельными слоями возникают тормозящие силы F или касательные напряжения $t = FS$, где S - площадь соприкосновения слоев. В результате взаимодействия слоев жидкости их скорости V в направлении n поперек потока изменяются от слоя к слою. Еще И.Ньютон на основании опытных данных предположил, что сила трения между слоями текущей жидкости пропорциональна модулю градиента скорости по нормали n к площадке S : $F = hS \frac{dV}{dn}$. Коэффициент пропорциональности η , который является мерой текучести жидкости (или, наоборот, мерой внутреннего трения), называется коэффициентом динамической вязкости $[\eta] = \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$. Основная единица измерения в системе СИ: 1 пуаз = 0.1 Н*с/м² = 0.1 Па*с. Внутреннее трение создается благодаря столкновениям молекул, которые приводят к замедлению или убыстрению движения среды. Для характеристики ускорения жидкости, связанного с действием сил внутреннего трения, принято использовать кинематический коэффициент вязкости. Он определяется как отношение коэффициента динамической вязкости к плотности жидкости ρ : $\nu = \frac{h}{\rho}$. Физической причиной внутреннего трения между слоями текущей жидкости является обмен количеством движения между молекулами. Чтобы подчеркнуть молекулярную природу вязких сил коэффициент кинематической вязкости нередко называют коэффициентом молекулярной вязкости. Размерность $[\nu] = \text{м}^2 / \text{с}$, единица измерения в СИ 1 Стокс = 10⁻⁴ м²/с. Значения коэффициентов вязкости (воды и воздуха) приведены в таблице 1. На основании опытов вязкость жидкости снижается с ростом температуры по логарифмическому закону: $\lg \nu = \lg \nu_0 - k_n (T - 273)$, где ν_0 - коэффициент кинематической вязкости при 0°C, k_n - множитель, характеризующий изменение кинематической вязкости в зависимости от температуры и рода жидкости. Например, для во-

ды в интервале температур 0 - 30°C коэффициенты, входящие в эмпирическую формулу вязкости, равны: $\nu_0 = 1.792 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $k_V = 0.0115 \text{ град}^{-1}$.

Таблица 1- Вязкость воды и воздуха.

Температура, °C	Вода		Воздух	
	$\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
0	1,792	1,792	1,709	1,320
20	1,005	1,007	1,803	1,500

В турбулентных потоках к вязким напряжениям трения добавляются турбулентные напряжения $s_{ij} = -rV_i'V_j'$, которые представляют собой потоки импульса, обусловленные пульсациями. Турбулентные напряжения, определяют трение при турбулентном режиме течения, связанное с обменом импульса, вызванным хаотическим характером перемешивания жидких частиц. В геофизической гидродинамике принимают, что турбулентное касательное напряжение зависит от поперечного градиента $s' = \mu' \frac{d\bar{V}}{dn}$, где μ' - динамический коэффициент турбулентной вязкости, $n' = \frac{m'}{r}$ - кинематический коэффициент турбулентной вязкости. Коэффициент турбулентной вязкости не связан с молекулярной структурой жидкости. Его свойства определяются статистическими свойствами вихрей, развивающихся в турбулентных потоках. Поэтому турбулентная вязкость зависит не от физических параметров текущей среды, а от внешних условий, в которых находится поток этой жидкости.

Описание экспериментальной установки

Установка для наблюдения ламинарных и турбулентных течений жидкости представляет собой установленную под небольшим углом к горизонту плоскую кювету с прозрачным дном (фронтальная пластина), по которой стекает поток воды с регулируемой скоростью. Над верхним концом кюветы установлена емкость с подкрашенной жидкостью, снабженная рядом трубочек с отверстиями малого диаметра, через которые эта жидкость поступает в поток воды в кювете. Если скорость потока мала, то наблюдается ламинарное течение жидкости, при

котором все подкрашенные струйки параллельны друг другу, и жидкость, текущая вдоль них, не перемешивается. При увеличении скорости потока ламинарность течения нарушается: появляются колебания подкрашенных струек, завихрения, т.е. поток жидкости турбулизируется. Т.о., для данных условий опыта существует критическая скорость потока V , при которой ламинарное течение превращается в турбулентное.

Порядок проведения работы

Задание 1. Проведение измерений на малом гидродинамическом лотке.

1. Отрегулировать подачу воды таким образом, чтобы струи подкрашенной жидкости имели четкие границы, движение частиц параллельно. Определить при этих условиях с помощью счетчика расход воды $Q = \frac{W}{\Delta t}$ ($\text{м}^3/\text{с}$), где W – объем жидкости в мерном стакане, Δt – время заполнения стакана. Измерить температуру жидкости T . Определить значение числа Рейнольдса (принимая, что поток воды распространяется по руслу прямоугольного сечения) из формулы $Re = \frac{rVD_c}{\nu}$, где $D_c = 2R_r$ и $R_r = \frac{S}{c} = \frac{bh}{2h + b}$ – гидравлический радиус, $c = 2h + b$ – смоченный периметр, b и h – ширина и толщина потока воды. Скорость потока жидкости при движении ее по фронтальной пластине установки определяется как $V = \frac{Q}{bh}$, где b – ширина дна установки (фронтальной пластины), h – толщина слоя жидкости. Провести фотографирование характера движения жидкости.

2. Постепенно увеличивать расход воды, проводя замеры расходов, расчеты чисел Рейнольдса и фотографируя картины изменения характера движения жидкости. Довести расход воды до уровня, при котором движение жидкости обоснованно становится турбулентным. Определить диапазон чисел Рейнольдса, характеризующих турбулентное движение.

3. Повторить последовательность измерений 2-3 раза. Вычислить средние значения чисел Рейнольдса. Представить результаты работ в виде таблицы 2:

4. На критическое число, определяющее смену режима течения, оказывает влияние множество факторов, в том числе характер изменения скорости движения жидкости. Поэтому критическое число Рейнольдса перехода, вообще говоря, располагается в некотором диапазоне в пределах (для течений в круглых трубах) 2000-4000. Граница смены режима зависит также от того, с какой стороны осуществляется развитие потока – от турбулентного или ламинарного. Поэтому переход к турбулентному течению от ламинарного течения может быть затянут до больших чисел Рейнольдса вплоть до 50000.

Таблица 2 - Результаты измерений.

№ опы-тов	Характерный вид течения жидкости (фото)	Расход Q , м ³ /с	Скорость V , м/с	Диаметр D_z , м	Температура жидкости, T , °С	Вязкость $\nu = \frac{\eta}{\rho}$, м ² /с	Число Рейнольдса $Re = \frac{rVD_z}{h}$
1							
2							
3							

5. Выполнить измерения в соответствии с п.п. 1,2, 3 задания №1 для двух различных значениях температур воды, выбрав их произвольно: например, для $T_1=15^\circ\text{C}$ и $T_2=25^\circ\text{C}$. Результаты измерений и расчетов представьте таблице.

6. Определить критические числа Рейнольдса в эксперименте при переходе от турбулентного режима к ламинарному режиму течения. Сравнить с результатами, полученными в задании №1.

Задание 2. Проведение измерений на большом гидродинамическом лотке.

1. Установить лоток в горизонтальное положение, проверить угол наклона лотка с помощью уровня. Отрегулировать подачу воды таким образом, чтобы достичь ламинарного течения жидкости (струи подкрашенной жидкости имеют четкие границы, движение частиц параллельно). Провести измерения:

а) расхода воды по расходомеру;

б) параметров сечения потока в двух крайних точках гидродинамического лотка.

Для измерения ширины потока использовать линейку, для измерения толщины слоя воды – штангенциркуль. Провести расчеты гидродинамического радиуса по

формулам, приведенным в задании 1. Провести расчеты скорости водного потока по формуле $V = \frac{Q}{bh}$ (обозначения см. в задании 1). В качестве толщины потока h взять среднее значение из двух измерений в противоположных концах лотка.

в) провести измерения скорости с помощью маркера,двигающегося с потоком; сравнить получившиеся результаты с результатами, полученными по расходомеру.

г) определить значение числа Рейнольдса для ламинарного течения (принимая, что поток воды распространяется по руслу прямоугольного сечения) из формулы

$$Re = \frac{rVD_c}{h}.$$

2. Сохраняя горизонтальное положение гидродинамического лотка последовательно увеличивать расход воды, проводя замеры расходов, расчеты чисел Рейнольдса и фотографируя последовательные картины изменения характера движения жидкости. Довести расходы воды до уровней, при которых движение жидкости обоснованно является турбулентным. Определить диапазон критических чисел Рейнольдса, характеризующих переход к турбулентному движению.

3. Повторить последовательность измерений 2-3 раза. Вычислить средние значения критических чисел Рейнольдса.

4. При скорости движения жидкости, соответствующей переходу в турбулентный режим, увеличить угол наклона гидродинамического лотка до максимально возможного (не изменять при этом расход воды в установке). Сфотографировать картину течения. Визуально оценить характер течения. Провести измерения и расчеты скорости потока двумя методами по схеме, описанной в разделе 1 задания 2. Сравнить скорости течения при горизонтальном и наклонном положении лотка.

5. Сохраняя наклонное положение гидродинамического лотка, уменьшить скорость потока, добиться ламинарного характера течения. Постепенно увеличивая расход воды определить границу перехода к турбулентному режиму течения. Провести измерения скорости потока (двумя методами), толщину слоя жидкости в двух точках гидродинамического лотка и определить критическое число Рей-

нольдса для наклонного положения лотка и характерное значение скорости, соответствующее переходу к турбулентному режиму течения.

6. Сравнить результаты ($Re_{кр}$), полученные при различных углах наклона гидродинамического лотка. Оформить отчет о выполнении задания.

Контрольные вопросы

3. Назовите характерные черты ламинарного и турбулентного движения.

4. Дайте определение числа Рейнольдса и поясните его гидродинамический смысл.

5. Каков критерий перехода режима движения от ламинарного к турбулентному?

6. Охарактеризуйте влияние вязкости, скорости и размеров потока на критическое число Рейнольдса.

7. Как изменится критическое число Рейнольдса при увеличении температуры и солёности жидкости?

Список рекомендуемой литературы

1. Нигматулин Р.И., Соловьев А.А Основы гидромеханики М.ЛИТТЕРРА, 2012.

Лабораторная работа №14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Чернова Н.И.

Цель работы: Ознакомление с культурами микроводорослей; овладение методами их исследований.

Задачи работы:

1) Методы сбора микроводорослей в природе: сбор проб фитопланктона, фитобентоса и перифитона; сбор наземных и почвенных водорослей.

2) Методы качественного изучения материала.

3) Методы хранения микроводорослей.

4) Методы работы со стерильными культурами.

5) Способы стерилизации питательных сред и посуды.

6) Ознакомиться под руководством преподавателя с различными видами микроводорослей из музейной коллекции НИЛ ВИЭ.

7) Изучить методы получения чистых культур микроводорослей.

8) Изучить состав основных питательных сред для культивирования микроводорослей и способы удешевления питательных сред при промышленном выращивании микроводорослей.

9) Ознакомиться с методами определения основных биогенных элементов в питательных средах: определение содержания карбонат- и бикарбонат-ионов, нитратов, фосфатов (Методики определения изложены в Приложении №1).

Принадлежности: 1) микроскопы: (Микмед-5 (ЛОМО); AxioPlan-2 Imaging с цифровой обработкой изображения AxioVision 3.1(C.Zeiss); люминесцентный микроскоп Микмед-2 (ЛОМО)); 2) пробирки со скошенными питательными средами, чашки Петри с агаровыми средами, колбы с жидкими питательными средами; 3) предметные и покровные стекла, стерильные пипетки, микробиологическая петля, спиртовка; 4) камера Горяева; 5) сухожаровой шкаф и миниавтоклав для стерилизации; 6) технические, электронные и аналитические весы (весы электронные AV2102C и весы аналитические Discovery DV 314C (фирма

ОНАУС)); 9) реактивы для приготовления питательных сред; 10) экспериментальный ФБР с открытыми плоскостными культиваторами и закрытыми фотокультураторами; 11) универсальная индикаторная бумага, портативный рН-метр фирмы HANNA; 12) фотоэлектроколориметр КФК-2 или спектрофотометр СФ-102; 13) качалки с подогреваемой платформой LS-110(ЛАБ-ПУ-01); 14) бокс абактериальной воздушной среды.

Введение в проблему

Исследования в области использования микроводорослей для получения биотоплива. Использование микроводорослей в энергетических целях давно привлекало внимание исследователей. Обнаружение способности цианобактерии *Anabena cylindrica* образовывать почти чистый водород относится к 1896 году. Уже 100 лет назад в Австралии собирали микроводоросль *Volvox globator*, образующую углеводороды, и использовали для топлива. В 1953г. создана первая пилотная установка по выращиванию микроводорослей для получения биотоплива на плоской крыше Массачусетского университета. Конверсия в метан биомассы водорослей, полученной в процессе очистки сточных вод, разрабатывалась в 60-х годах прошлого столетия. Проводились исследования с целью получения моторного топлива из микроводорослей, выращиваемых в открытых прудах с использованием отходящего CO₂. Была построена открытая система для культивирования водорослей площадью 1000м², создана коллекция перспективных микроводорослей. Несмотря на неутешительные выводы предыдущих 20-ти летних исследований изучение водорослей в качестве энергетического сырья интенсивно продолжалось, и сейчас уже говорят о водорослевой индустрии.

Топливо, производимое из водорослей относят к биотопливам третьего поколения (водоросли, специально выращиваемые для энергетических целей) и четвертого поколения (генетически модифицированные водоросли, конвертирующие CO₂ непосредственно в топливо). Интерес к водорослевой энергетике определяется тем, что биомасса водорослей по большинству характеристик превосходит требования, предъявляемые к наземному растительному сырью:

- Водоросли являются фотоавтотрофами с высокой скоростью роста.

- Микроводоросли способны синтезировать широкий круг сырья для биотоплива.

- Продуктивность микроводорослей по биомассе и маслу на порядки превышает продуктивность наземных, в том числе масличных, растений. В некоторых видах водорослей при оптимальных условиях культивирования содержание липидов превышает таковое в масличных растениях: у *Scenedesmus dimorphus* содержание липидов составляет 16–40%, у *Prymnesium parvum* – 22–38%, *Euglena gracilis* – 14–20%, *Chlorella vulgaris* – 14–22%, *Dunaliella salina* – 16–44%, *Haematococcus pluvialis* – 25–45%, *Tetraselmis suecica* – 20–30%, *Isochrysis galbana* – 22–38%, *Nannochloropsis* sp. – 33–38%, *Stichococcus* sp. – 40–59%, а у *Botryococcus braunii* – до 80%, при этом площади их выращивания значительно сокращаются по сравнению, например, с канолой (рапсом) в 50...100 раз (таблица 1).

- Для выращивания водорослей не требуются пахотные земли, плантации можно размещать на поверхности водоемов или на непригодных для земледелия почвах (засоленных, пустынных и др.).

- Водоросли требуют намного меньше воды, чем традиционные зерновые культуры. Их можно выращивать в соленой воде, на сточных водах, ослабляя давление на ресурсы чистой воды.

- Микроводоросли не являются традиционным пищевым и кормовым сырьем.

- Одним из возможных путей сокращения стоимости биотоплива из микроводорослей является одновременное получение из них ценных сопутствующих продуктов для химической, фармацевтической, медицинской, пищевой, кормовой промышленности (бета-каротин, астаксантин, фикоцианин, хлорофилл, глицерин и т.д.) и использование при их культивировании отходов других производств.

Сравнительная оценка источников сырья для производства биодизеля*

Культура	Урожай масла, л/га	Площадь, необходимая для производства масла (Мга)**
Кукуруза	172	1540
Соя	446	594
Канола	1190	223
Ятрофа	1892	140
Кокосовый орех	2689	99
Пальмовое масло	5950	45
Микроводоросли (30%)***	58 700	4,5
Микроводоросли (70%)****	136 900	2

* Данные получены в экспериментах по выращиванию микроводорослей на площади 5681 м² в Новой Зеландии.
 ** Для замены 50% всего транспортного топлива в США
 *** 30% масла (от биомассы по сухому весу)
 **** 70% масла (от биомассы по сухому весу)

- Изъятие культивируемой биомассы микроводорослей для нужд энергетики не нарушает естественную консервацию органического вещества в биосфере, при этом плантации микроводорослей служат эффективным краткосрочным стоком антропогенного CO₂, конвертируя его в энергию высокой плотности.

- При существующих в мире технологиях становится возможным крупномасштабное выращивание биомассы микроводорослей круглогодично не только в условиях тропического и субтропического климата, но и в умеренных климатических условиях, даже при отрицательных зимних температурах.

Для обеспечения водорослевой индустрии промышленными культурами микроводорослей необходимо:

- создать эффективный высокопроизводительный метод выделения и отбора перспективных штаммов водорослей в природе;
- исследовать общедоступные коллекции микроводорослей и создать базу данных штаммов и их характеристик;
- развить исследования по изучению влияния региональных условий на селекционные штаммы.

Идеальная скрининговая система продуцентов липидов среди микроводорослей должна отвечать следующим требованиям: отбирать культуры с высоким липидным содержанием, обладающие высокой скоростью роста, устойчивые к флуктуациям окружающей среды (Т, рН, соленость среды, контаминация чужеродными видами). Для интенсификации скрининга необходима соответствующая аппаратура и разработка экспресс-методов, включающих анализ биохимических особенностей каждого изолята, например, с помощью масс-спектрометрии с лазерной десорбцией/ионизацией на установке MALDI-TOF-MS с параллельной идентификацией его по нуклеотидным последовательностям 18s рРНК и ITS рДНК в сравнении с белковыми профилями биомаркеров из имеющихся баз данных. Возможно применение цитохимических методов с использованием специфических красителей для липидов.

Из 30 – 50 тысяч существующих видов микроводорослей в рамках программы Aquatic Species Program (ASP, USA, 1988-1996 гг.) было выделено 3 тысячи штаммов, среди которых 300 культур обладали повышенным содержанием липидов и относились в основном к зеленым и диатомовым водорослям. По этой причине долгое время эти группы считались наиболее перспективными для выделения липидосодержащих водорослей, пока не было обнаружено наличие таких водорослей среди других таксономических групп и было статистически доказано, что повышенный синтез и аккумуляция липидов скорее видовая или даже штаммовая специфичность. Решением SERI/NREL (Solar Energy Research Institute/National Renewable Energy Laboratory, US) создана коллекция микроводорослей в рамках ASP программы, являющаяся ценным генетическим ресурсом. Эта первая коллекция микроводорослей из пресных и соленых водоемов находится в Университете на Гавайях и доступна для исследователей.

Помимо активного поиска микроводорослей-продуцентов липидов в природе проводится создание новых штаммов микроводорослей путем мутагенеза и методами генной инженерии, отвечающих основным требованиям промышленного производства – повышению продуктивности по биомассе и целевому продукту.

Увеличение эффективности фотосинтеза и оптимизация процесса биосинтеза липидов являются задачами многих исследовательских программ. Известно, что

водоросли могут эффективно использовать до 10% от полного солнечного света. Сверх этого уровня свет тратится не только впустую, но может повредить фотосинтетический аппарат, вызывая фотоингибирование. Одна из возможностей повышения эффективности использования света состоит в уменьшении размера светособирающей антенны путем мутации или генной инженерии. Это позволит фотосинтетическому аппарату абсорбировать только такое количество света, которое он может использовать, а результатом будет снижение потерь, уменьшение опасности фотоокисления в фотосинтетическом реакционном центре и увеличение сверхпродукции водорослевой культуры. Чтобы избежать проблем культивирования микроводорослей, связанных с освещенностью, в промышленном масштабе исследователи пошли по пути создания гетеротрофных штаммов водорослей из облигатных фотоавтотрофов. Введение в микроводоросль *Phaeodactylum tricornutum* гена, отвечающего за транспорт глюкозы, позволило ей утилизировать экзогенный органический углерод и расти вне зависимости от света. Это первая успешная трофическая конверсия облигатного фотоавтотрофа путем метаболической инженерии, показавшая, что способ клеточного питания может быть фундаментально изменен интродукцией одного гена. Китайскими исследователями запатентован способ получения биодизеля с использованием гетеротрофной хлореллы, шт. *Chlorella kessleri*, обеспечивающий высокую продуктивность по биомассе – 108 г/л и 52% масла на сухой вес. Для сокращения расходов по производству водорослевого биодизеля за счет уменьшения размеров инфраструктуры для выращивания, облегчения сбора биомассы водоросли и выделения масла компания SOLAZYME, US также работает над получением генетически модифицированных штаммов водорослей с гетеротрофным типом питания. Использование гетеротрофных штаммов микроводорослей снимает вопросы освещенности и позволяет использовать развитую инфраструктуру микробиологической промышленности, но ставит проблему применения углеводов для их питания, что значительно удорожает стоимость производства биодизеля.

Среда для культивирования Заррук'а (в г/л дистиллированной воды)

Макроэлементы	Микроэлементы	
	Раствор А (введение в среду: 1 мл/л среды)	Раствор Б (введение в среду: 1 мл/л среды)
$\text{Na HCO}_3 - 16,8,$ $\text{KNO}_3 - 3,$ $\text{K}_2\text{HPO}_4 - 0.6,$ $\text{K}_2\text{SO}_4 - 1.0,$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.2,$ $\text{NaCl} - 1.0,$ $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 0.04,$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.018,$ трилон Б – 0.08.	$\text{H}_3\text{BO}_3 - 2.86,$ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 1.81,$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.22,$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 0.08,$ $\text{MoO}_3 - 0.015.$	$\text{K}_2\text{Cr}_2 (\text{SO}_4)_4 \cdot 24 \text{H}_2\text{O} - 0.096,$ $\text{NH}_4\text{VO}_3 - 0.023,$ $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.048.$

Таблица 3.

Среда для культивирования BG-11 (в г/л дистиллированной воды)

Макроэлементы	Микроэлементы	
	Раствор А (введение в среду: 1 мл/л среды)	Раствор Б (введение в среду: 1 мл/л среды)
$\text{NaNO}_3 - 1.50$ $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} - 0.04$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.076$ $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 0.036$ Лимонная кислота – 0.006 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.006$ трилон Б – 0.001 $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 0.02$	$\text{H}_3\text{BO}_3 - 2.86,$ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 1.81,$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.22,$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 0.08,$ $\text{MoO}_3 - 0.015.$	$\text{K}_2\text{Cr}_2 (\text{SO}_4)_4 \cdot 24 \text{H}_2\text{O} - 0.096,$ $\text{NH}_4\text{VO}_3 - 0.023,$ $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0.048,$ $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 0.018,$ $\text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3 - 0.04,$ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - 0.044$

Порядок проведения эксперимента

1. Описать рост микроводорослей из лабораторной музейной коллекции на различных питательных средах: на косяках, на чашках Петри, на жидких питательных средах.
2. Научиться делать препараты микроводорослей на предметных стеклах.
 - Изучить микроводоросли с помощью различных микроскопов (Микмед-5 (ЛОМО); AxioPlan-2 Imaging с цифровой обработкой изображения AxioVision 3.1(C.Zeiss); люминесцентный микроскоп Микмед-2 (ЛОМО)).

– Определить размеры микроводорослей.

– Провести окрашивание предложенных преподавателем различных культур микроводорослей специфическими красителями для выявления в них липидов (Судан черный В, Судан красный).

3. Провести количественный учет микроводорослей с помощью камеры Горяева.

4. Проанализировать с помощью микроскопов предложенный преподавателем образец микроводорослей из природной среды. Определить, к какому крупному таксону относятся предложенные водоросли.

5. Ознакомиться с правилами работы на технических электронных и аналитических весах (весы электронные AV2102C и весы аналитические Discovery DV 314C (фирма OHAUS)).

- Ознакомиться с правилами измерения на фотоколориметре КФК-2 и спектрофотометре СФ-102; на портативном рН-метре фирмы HANNA.

- Взять навески основных питательных элементов согласно рецептурам выбранных питательных сред на аналитических весах. Отдельно приготовить два раствора микроэлементов для этой среды. Состав питательных сред приведен в табл.2 и табл.3. Приготовить по 3л питательной среды Заррук'а для выращивания *Arthrospira / Spirulina platensis utamm rsemsu-1/02-II* и среды BG-11 для выращивания *Nannochloropsis sp. utamm rsemsu N-1/11-B*, измерить рН питательных сред и простерилизовать среды в автоклаве. Отобрать по 100 мл каждой питательной среды для дальнейшего определения содержания соединений азота, фосфора и углерода. Провести определения содержания карбонат- и бикарбонат-ионов, нитратов, фосфатов согласно приведенной методике (см. Приложение №1).

6. Приготовить пробирки, колбы, пипетки, чашки Петри и простерилизовать их в сухожаровом шкафу. Произвести посев микроводорослей из природного образца в колбы на жидкую питательную среду BG-11 и на чашки Петри с агаризованной питательной средой BG-11.

7. Приготовить посевной материал из музейных культур *Arthrospira platensis ut. rsemsu-1/02-II* и *Nannochloropsis sp. ut. rsemsu N-1/11-B*. Сделать смыв с косяков указанных микроводорослей стерильными питательными средами. Засе-

ять полученным материалом колбы объемом 250мл с питательными средами. Поставить засеянные колбы на качалку для выращивания посевного материала при освещении 2500-3000 лк и температуре 25°C в течение 5-7 суток.

Содержание отчета

Составить отчет по лабораторной работе: описать последовательность действий, описать качественные результаты определения липидов с помощью красителей. После выращивания водорослей на чашках Петри провести подсчет колоний через 5 и 10 дней, отмечая колонии точками; произвести подсчет микроводорослей в образце (задание 5); указать результаты в отчете; привести результаты определения карбонат- и бикарбонат-ионов, нитратов, фосфатов в отобранных образцах питательных сред и культуральной жидкости при выращивании микроводорослей. Показать результаты расчета необходимых подкормок при выращивании водорослей в течение 2 месяцев.

Контрольные вопросы:

- 1) Что такое микроводоросли? Приведите примеры.
- 2) Что вы знаете о систематике, номенклатуре и классификации водорослей?
- 3) С чем связаны поиски нетрадиционных видов сырья для биоэнергетики?
- 4) Что такое биотопливо 1-го, 2-го и 3-го поколений?
- 5) Какие виды биотоплива применяются в настоящее время и из какого сырья их производят?
- 6) Биохимический состав водорослей на примере микроводорослей /цианобактерий *Arthrospira platensis* и зеленой микроводоросли *Nannochloropsis sp.*
- 7) Какие питательные вещества необходимы для эффективного выращивания микроводорослей? Что такое макро- и микроэлементы? Какие химические вещества называют биогенными элементами?
- 8) Какими методиками определения биогенных элементов вы пользовались в лабораторной работе?

Лабораторная работа №15

МЕТОДЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ; ПРАКТИЧЕСКОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Чернова Н.И.

Цель работы: Изучить основные методы лабораторного культивирования микроводорослей.

Задача работы: Практическое выращивание двух видов микроводорослей в открытом и закрытом культиваторах: получение образцов биомассы микроводорослей *Arthrospira platensis* *um. rsemsu-1/02-II* и *Nannochloropsis* sp. шт. rsemsu N-1/11-B.

Принадлежности: 1) микроскопы: (Микмед-5 (ЛОМО); AxioPlan-2 Imaging с цифровой обработкой изображения AxioVision 3.1(C.Zeiss); люминесцентный микроскоп Микмед-2 (ЛОМО)); 2) пробирки с выращенными культурами микроводорослей на скошенном агаре, на чашках Петри с агаровыми средами, в колбах с жидкими питательными средами; 3) предметные и покровные стекла, стерильные пипетки, микробиологическая петля, спиртовка; 4) красители судан черный В, судан красный III; флуоресцентный краситель Нильский красный; 5) сухожаровой шкаф и миниавтоклав для стерилизации; 6) технические, электронные и аналитические весы (весы электронные AV2102C и весы аналитические Discovery DV 314C (фирма OHAUS)); 7) универсальная индикаторная бумага, портативный рН-метр фирмы HANNA; 8) фотоэлектроколориметр КФК-2 и спектрофотометр СФ-102 9) экспериментальный ФБР с открытыми плоскостными культиваторами и закрытыми фотокультиваторами; 10) газоанализатор Drager X-am 7000; 11) люксметр.

Введение в проблему

Способы культивирования микроводорослей и описание экспериментального модуля фотобиореактора, созданного в НИЛ ВИЭ.

Для реализации биосинтетических возможностей природных и реконст-

руированных штаммов микроводорослей-фотоавтотрофов используются два способа культивирования: в фотобиореакторах (ФБР) – закрытый способ - и в открытых культиваторах. ФБР обеспечивают контролируемые условия и высокий выход продукции, но дороги. Открытые пруды значительно дешевле, но легко подвергаются контаминации, и только три вида водорослей оказались способными к широкомасштабному культивированию. Системы выращивания водорослей, предлагаемые разными компаниями, значительно отличаются, что объясняется целым рядом причин – местоположением культиваторов, климатическими условиями, свойствами используемых водорослей и т.д. Для производства микроводорослевого масла пригодными представляются и ферментеры для выращивания их гетеротрофных штаммов, но прежде, чем производство масла из микроводорослей станет конкурентоспособным, потребуются научно-исследовательские работы по оптимизации содержания масла в них, повышению продуктивности по биомассе, замене дорогого источника углерода на более дешевый.

В лабораторной работе используется созданный в НИЛ ВИЭ экспериментальный модуль фотобиореактора для эффективного культивирования микроводорослей, который состоит из:

- 1) закрытых фотобиореакторов – 1-2-литровых колб, количество которых может тиражироваться в зависимости от целей и задач постановки опыта;
- 2) шести открытых культиваторов, представляющих собой открытые кюветы размером 500x500 мм, в которых находится жидкая питательная среда с микроводорослями. Глубина слоя культуральной жидкости может изменяться от 50 до 100 мм. Каждый культиватор имеет свой независимый светодиодный источник освещения с определенным спектром и регулируемой интенсивностью светового потока, систему подачи газовой смеси и систему перемешивания с возможностью изменения скорости (от 0,6 см/с до 16 см/с);
- 3) системы газоподготовки, которая включает в себя резервуар CO_2 – газгольдер объемом 600 л, смесители, подводящие трубки, микровентили, регулирующие скорость подачи газов и газовых смесей. Газгольдер являлся долговременным источником CO_2 , обеспечивающим постоянное давление смеси на входе. Таким образом, решалась проблема поддержания неизменных условий эксперимента в те-

чение длительного периода. В состав лабораторной установки были также включены микрокомпрессоры, позволяющие непрерывно прокачивать газоздушную смесь через питательную среду с культурой микроводорослей;

4) газоанализатора Dräger X-am 7000, который позволял проводить измерения концентрации CO_2 и кислорода в подаваемой в фотокультиваторы газоздушной смеси в любом заданном режиме (непрерывные измерения в течение длительного времени/разовые измерения). Предварительно газоанализатор был откалиброван для работы в диапазоне концентраций CO_2 (0,03-5)%;

5) системы искусственного освещения с лампами ДРЛФ-400, для создания освещенности (интенсивность 2.0 -7.0 клк) и светодиодами мощностью 3 Вт: красные с длиной волны 640-670 нм, синие с длиной волны 440-470 нм и белые светодиоды, обеспечивающие цветовую температуру 5000К – 6000К и регулируемой общей интенсивностью излучения от 15 микромоль фотонов/ м^2 за секунду до 500 микромоль фотонов/ $\text{м}^2/\text{с}$.

Максимальная интенсивность освещения используется для создания одного из основных параметров физиологического стресса для микроводорослей, при котором происходит аккумулялирование и накопление в выращенных клетках липидов. Экспериментальная установка позволяет также проводить исследования эффективности утилизации углекислого газа при культивировании различных видов микроводорослей, Одновременно с этим установка может иметь более широкое применение, поскольку позволяет оптимизировать процесс накопления культуры микроводоросли (интенсифицировать процесс наращивания биомассы), проводить скрининг культур микроводорослей–потенциальных секвесторов CO_2 , осуществлять в широких пределах вариации условий выращивания (состав газовых смесей и интенсивность их прокачки, освещенность, виды микроводорослей и т.д.) осуществлять длительные эксперименты в полуавтономном режиме.

Порядок проведения эксперимента

1. Ознакомиться с методами определения плотности культур микроводорослей: спектрофотометрический метод и прямой метод взвешиванием сухой био-

массы, доведенной до постоянного веса (см. раздел *Методика определения сухого веса биомассы Приложения №1*).

2. Провести калибровку фотоэлектроколориметра КФК-2 или спектрофотометра СФ-102 согласно методике, изложенной в Приложении №1 для двух видов водорослей (*Arthrospira*, *Nannochloropsis sp.*). Провести пересчет начальной концентрации в оптических единицах в значения плотности культуры в г/л по сухому весу.

3. Вырастить биомассу двух культур микроводорослей *Arthrospira platensis* *um. rsemsu-1/02-II* в открытых плоскостных культиваторах и *Nannochloropsis sp. um. rsemsu N-1/11-B* в закрытых фотокультиваторах:

- Приготовить 40 л питательной среды Заррук'а и 5 л среды BG-11.
- Произвести засев, полученным в задании №1 посевным материалом из культур микроводорослей *Arthrospira platensis um. rsemsu-1/02-II* двух открытых плоскостных культиваторов экспериментального модуля фотобиореактора заполненных 20 литрами питательной средой Заррук'а каждый. Провести определение начальной плотности культуры на КФК-2 ($\lambda=670$ нм) или спектрофотометре СФ-102 ($\lambda=670$ нм): начальная оптическая плотность должна быть не менее 0,2.
- Произвести засев, полученным в задании №1 посевным материалом культуры микроводорослей *Nannochloropsis sp. um. rsemsu N-1/11-B* пяти закрытых однолитровых фотокультиваторов, наполовину заполненных питательной средой BG-11. Провести определение начальной плотности культуры на КФК-2 ($\lambda=750$ нм) или на спектрофотометре СФ-102 ($\lambda=750$ нм): начальная оптическая плотность должна быть не менее 0,2.
- Подвести к каждому фотокультиватору шланги для барботажа газо-воздушной смесью с содержанием CO₂ 2% (объемных). Подтвердить (определить) концентрацию CO₂ в газо-воздушной смеси с помощью газоанализатора Drager X-am 7000.
- Обеспечить выращивание микроводорослей в следующем режиме: освещенность 4000 лк температуре 27 С, режим свет:темнота = 12:12 в течение 14 суток.

4. Провести расчет потребления за время культивирования основных биогенов. Провести расчет необходимых подкормок для восполнения среды до оптимального уровня.

5. Построить кривую роста для каждой культуры, используя начальное и конечное значения концентраций, а также промежуточные данные преподавателя. Вычислить удельную скорость роста и суммарную продуктивность каждой культуры микроводорослей за время культивирования.

Подготовка отчета по работе

Составить отчет по лабораторной работе: описать последовательность действий, построить калибровочные графики для указанных видов водорослей, найти коэффициенты пересчета оптической плотности на концентрацию биомассы микроводорослей в культуральной жидкости по сухому весу, указать результаты определения плотности культур. Построить кривые роста для каждой культуры, рассчитать продуктивность по биомассе двух видов микроводорослей (по сухому весу); сравнить с продуктивностью традиционных агрокультур; сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие способы выращивания микроводорослей вам известны?
2. Что определяет выбор способа культивирования микроводорослей?
3. Каковы преимущества и недостатки соответственно открытого и закрытого способа культивирования?
4. Какие микроводоросли можно выращивать открытым способом?
5. Что такое фотоавтотрофия, миксотрофия и гетеротрофия применительно к микроводорослям?
6. Преимущества автотрофного и гетеротрофного способов культивирования микроводорослей.
7. Сравните урожайность микроводорослей по биомассе и по липидам (маслу) с таковой у традиционных агрокультур.

Лабораторная работа №16

МЕТОДЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ: ВЫРАЩИВАНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СТРЕССА

Чернова Н.И.

Цель работы: овладение методами оптимизации способов культивирования микроводорослей для увеличения выхода целевого продукта.

Задачи работы: Практическое выращивание двух видов микроводорослей в условиях физиологического стресса с целью повышения содержания липидов в биомассе.

Принадлежности: 1) микроскопы: (Микмед-5 (ЛОМО); AxioPlan-2 Imaging с цифровой обработкой изображения AxioVision 3.1(C.Zeiss); люминесцентный микроскоп Микмед-2 (ЛОМО)); 2) предметные и покровные стекла, стерильные пипетки, микробиологическая петля, спиртовка; 3) технические, электронные и аналитические весы (весы электронные AV2102C и весы аналитические Discovery DV 314C (фирма OHAUS)); 4) универсальная индикаторная бумага, портативный рН-метр фирмы HANNA; 5) фотоэлектрокалориметр КФК-2; 6) экспериментальный ФБР с открытыми плоскостными культиваторами и закрытыми фотокультиваторами; 7) газоанализатор Drager X-am 7000; 8) люксметр; 9) открытые плоскостные культиваторы со светодиодной системой освещения до 500 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{sec}$; 10) центрифуга Rotanta-400; 11) красители судан черный В, судан красный III и флуоресцентный краситель Нильский красный; 12) магнитные мешалки типа ESP фирмы VELP.

Описание явления

Энергетический потенциал микроводорослей стимулировал научно-исследовательские работы по изучению механизмов накопления липидов. Было показано, что в зеленых водорослях индукция синтеза и аккумуляции липидов идет в условиях азотного голодания, в диатомовых водорослях – при нехватке

кремния, в силу того, кремний является главным компонентом клеточной стенки диатомей. Для них установлено, что недостаток кремния в питательной среде увеличивает экспрессию, по крайней мере, одного гена, включенного в липидный синтез – ацетил-КоА-карбоксилазы. Ген, кодирующий продукцию этого фермента, был выделен и клонирован. Изоляция этих генов способствовала развитию систем переноса генов в диатомовых. Была показана возможность его сверхэкспрессии, что позволяет надеяться, что увеличение уровня активности ацетил-КоА-карбоксидазы в клетке приведет к росту продуктивности масла в водорослях. Показано, что недостаток питания может затрагивать такие специфические биохимические пути, как липидная аккумуляция, сопровождаемая увеличением запасных липидов (триацилглицеридов, ТАГ) по отношению к мембранным полярным липидам.

Следует подчеркнуть, что условия, благоприятствующие накоплению ТАГ, являются стрессовыми: они препятствуют делению клеток и замедляют рост культуры, снижая продуктивность, что входит в противоречие с задачей получения максимального накопления биомассы с максимальным содержанием целевого продукта (в данном случае ТАГ). Одним из возможных путей решения этой задачи явилось разобщение двух процессов: 1-я стадия - накопление биомассы на полной питательной среде, в оптимальных условиях, обеспечивающих высокую продуктивность по биомассе и 2-я стадия - перевод полученной биомассы в условия физиологического стресса для индукции синтеза нейтральных липидов (ТАГ). Физиологический стресс может быть создан голоданием по азоту и/или фосфору, или кремнию, осмотическим стрессом, интенсивностью и спектральным составом освещения, рН, температурным режимом, воздействием тяжелых металлов и других химических веществ. Так, на примере *Nannochloropsis sp.* было показано, что используя полную питательную среду по азоту можно получить 50кг/липидов/га/день при одностадийной технологии. В двухстадийном процессе в условиях стресса путем азотного голодания липидная продуктивность увеличивается до 90кг/липидов/га/день.

Все вышесказанное явилось основанием для проведения лабораторной работы по изучению влияния стресса на накопление липидов. Для этого следует осу-

ществовать перевод выращенной на 1-й стадии биомассы двух видов микроводорослей во 2-ю стадию, в стрессовые условия, для усиленной аккумуляции нейтральных липидов (ТАГ).

Порядок проведения эксперимента

1. Собрать выросшую биомассу *Arthrospira / Spirulina platensis*:

– Отключить перемешивание и барботаж в открытых культиваторах для подъема биомассы на поверхность. Собрать всплывшую биомассу и отделить ее от культуральной жидкости гравитационным методом. Для этого поместить собранную биомассу на сита из нержавеющей низкоуглеродистой проволоки с размером ячеек 150-200 мкм, отфильтровать, отмыть физраствором и повторно отфильтровать.

– Отобрать около 10 г влажной биомассы для последующего выращивания ее в условиях физиологического стресса

– Определить влажность собранной и отфильтрованной биомассы по методике определения сухого веса биомассы, приведенной в Приложении №1.

2. Собрать выросшую биомассу *Nannochloropsis* sp.:

- Ознакомиться с устройством и правилами работы на центрифуге Rotanta-460.

– Всю культуральную жидкость из закрытых фотокультиваторов отцентрифугировать на центрифуге Rotanta-400, подобрав необходимую скорость вращения и время для формирования осадка (диапазон скорости вращения центрифуги – от 2,5 до 6 тыс. оборотов в мин., время – от 1 до 10 мин), осадок промыть физраствором и повторно отцентрифугировать.

– Отобрать около 10г влажной биомассы для последующего выращивания ее в условиях физиологического стресса

– Определить влажность собранной и отцентрифугированной биомассы по методике определения сухого веса биомассы, приведенной в Приложении №1.

3. Биомассу двух видов микроводорослей, выращенную в оптимальных условиях условиях окрасить суданом черным В и флуоресцентным красителем Ниль-

ским красным, посмотреть в обычном и люминесцентном микроскопах при максимальном увеличении и сфотографировать.

4. Создать для собранной биомассы *Arthrospira / platensis* и *Nannochloropsis sp.* условия физиологического стресса:

– Сделать навески и приготовить по 1 л питательных сред Заррук'а и BG-11 без источников азота и фосфора, простерилизовать в мини-автоклаве (при 1 атм. 45 мин.).

-Засеять по одному стеклянному кристаллизатору, наполненному 0,5 л среды Заррук'а и BG-11 каждый без азота и фосфора соответствующей биомассой, отобранной при выполнении заданий 1 и 2. Кристаллизаторы установить на магнитные мешалки типа ESP фирмы VELP (скорость 800 оборотов/мин). Обеспечить освещение кристаллизаторов белыми светодиодами фирмы Edison Opto EDEW-3LS6-FR с освещенностью 250 и 450 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{sec}$ соответственно для артроспиры и наннохлоропсиса. Температура питательной среды 27°C. Продолжительность культивирования – 2 суток для *Nannochloropsis sp.* и 7 суток для *Arthrospira / Spirulina platensis*.

5. Биомассу двух видов микроводорослей, выращенную в условиях физиологического стресса, окрасить суданом черным В, и флуоресцентным красителем Нильским красным, посмотреть в обычном и люминесцентном микроскопах при максимальном увеличении и сфотографировать. Сравнить фотоснимки окрашенных культур, выращенных на 1-й стадии в оптимальных условиях, и после стадии физиологического стресса. По степени окрашивания липидов сделать выводы.

Содержание отчета.

Составить отчет по лабораторной работе: описать последовательность действий. Отобразить результаты определения количества собранной биомассы по сырому и сухому весу. Привести выбранные режимы работы центрифуги. Составить базу данных из полученных микрофотографий, окрашенных клеток микроводорослей суданом черным В и Нильским красным до и после физиологического стресса. Сдать образцы преподавателю для дальнейшего анализа на содержание белков, липидов, углеводов.

Контрольные вопросы

1. Какие методы сбора биомассы микроводорослей существуют?
2. В чем преимущества сбора биомассы *Arthrospira / Spirulina platensis* перед другими микроводорослями?
3. Какие способы сбора биомассы *Nannochloropsis* sp. используют в промышленных масштабах?
4. Какие варианты физиологического стресса, приводящего к повышенному аккумулялированию липидов в микроводорослях, вы знаете?
5. Какие сравнительные результаты окрашивания липидов в биомассе микроводорослей до и после физиологического стресса вы получили? Какие можно сделать выводы?
6. Что такое биодизельное топливо? В чем его основные преимущества и недостатки?
7. Какими способами можно получить биодизельное топливо из липидов микроводорослей?
8. Каковы перспективы применения биомассы микроводорослей для производства биодизеля?

Рекомендуемая литература к Лабораторным работам № 14, 15, 16.

1. Анисимова О.В., Гололобова М.А. Краткий определитель родов водорослей. Учебное пособие//М.: Изд-во МГУ, 2006. 158с.
2. Ботаника: Курс альгологии и микологии: Учебник / Под ред. Ю.Т.Дьякова. – М.:Изд-во МГУ, 2007. 559с.
3. Каталог культур микроводорослей в коллекциях СССР. М.: Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, 1991. С.54.
4. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. М., 1988. С.104-108.
5. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. М.: Изд-во «университет и школа», 2003. 157с.
6. Унифицированные методы анализа вод СССР. Вып. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С.29-31.

Приложение №1: Методики и методические материалы к лабораторным работам №14, №15, №16 (Использована рукопись «Руководство по приготовлению и анализу питательных сред для культивирования микроводорослей», подготовленная н.с. НИЛ ВИЭ к.т.н. Н.Н.Михайловской, 1997г.)

Методика определения сухого веса биомассы

Берут 100 мл усредненной пробы (объем можно варьировать) и отфильтровывают через фильтр с размером пор 0,45 мк (можно использовать и бумажный фильтр, не пропускающий водоросли). При использовании фильтров типа Sinrog следует подвергнуть их предварительной обработке путем трехкратного кипячения в дистиллированной воде по 15 минут. Подготовленные фильтры сушат до постоянного веса при 105° С и хранят в эксикаторе над прокаленным хлористым кальцием, взвешивают фильтры на аналитических весах. Фильтрование проводят под вакуумом на фильтровальной воронке с прижимом фильтра уплотняющим кольцом. Сырую биомассу на фильтре отмывают от солей дистиллированной водой, подкисленной соляной кислотой до pH=4, взятой в объеме 50-100 мл. Фильтр с отмытой биомассой высушивают в сушильном шкафу при 105° С, охлаждают в эксикаторе и взвешивают. Количество биомассы рассчитывают в г/л:

$$A = \frac{a * 1000}{V} \quad (1)$$

г/л, где а – вес биомассы на фильтре в г, V - объем отфильтрованной пробы в мл, А – количество биомассы в г/л. Фильтрат пробы (до промывки фильтра водой) используется для химического анализа биогенов, карбонатов и пр.

Методика калибровки фотоколориметра (спектрофотометра) и определения содержания биомассы оптическим методом

Вес биомассы г/л можно определить по оптической плотности пробы, измеренной при 670 (для сине-зеленых водорослей) или 750 нм (для зеленых водорослей) после предварительного построения калибровочного графика и вычисления коэффициента "К".

Для построения графика приготавливают несколько стандартных суспензий микроводорослей по 150-200 мл, последовательно разбавляя исходную суспен-

зию дистиллированной водой. Например, 1-исходная суспензия, 2-разбавленная водой в соотношении 2:1; и далее в соотношении 1:1, 1:2, 1:3. Далее проводят измерение оптической плотности суспензии и оценку веса биомассы из 100 мл суспензии по выше приведенной методике (с промывкой фильтра дистиллятом рН=4 и взвешиванием высушенного фильтра). Полученные результаты представить в виде таблицы и построить график зависимости оптической плотности D при 670 нм, или иной другой длины волны в зависимости от вида культуры микроводорослей (ось ординат) от концентрации биомассы "С" г/л (ось абсцисс), проведите аппроксимацию полученных результатов линейной зависимостью вида $C=K*D$, определите коэффициент K , который равен тангенсу угла наклона полученной прямой к оси абсцисс. Следует учесть, что K зависит от состава культуры микроводорослей и величины клеток, поэтому необходима периодическая проверка графика.

Для определения биомассы этим способом берут среднюю пробу, хорошо перемешанную, разбавляют при необходимости, измеряют оптическую плотность и рассчитывают содержание биомассы в г/л по формуле:

$$A = D(l = 670 \text{ или } 655 \text{ нм})Kn \quad (2)$$

где n – кратность разбавления пробы. Оптимальное значение $D = 0.4 - 0.6$.

Методика определения карбонат- и бикарбонат-ионов, нитратов, фосфатов

Для анализа питательных сред, приготовленных для выращивания микроводорослей, используются унифицированные методики, применяемые в гидрохимической практике анализа природных вод, после предварительной подготовки пробы путем фильтрования и разбавления, так как концентрации биогенных элементов в среде достигают высоких значений.

Фотометрический метод определения биогенных элементов, а именно азота и фосфора в различных формах, основаны на колориметрических реакциях этих соединений с реактивами и измерении оптических плотностей полученных растворов. Измерения проводятся в том интервале концентраций, который соответствует линейной зависимости оптических плотностей растворов от концентраций

исследуемого вещества (т.е. подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера). Проверка линейности осуществляется по стандартным растворам при построении калибровочного графика. Измерения проводятся на спектрофотометре. В лаборатории можно использовать следующие приборы: стационарный спектрофотометр СФ-26 и переносной (полевой) фотоколориметр КФК, самопишущий прибор Specord UV VIS, фотометр «Эксперт-003» ($\lambda=655$ нм), или спектрофотометр СФ-102 ($\lambda=670$ нм).

Схема разбавления пробы

Для анализа питательной среды берут среднюю пробу из культиватора и фильтруют через бумажный фильтр. Полученный фильтрат для анализа разбавляют следующим образом:

– Для определения карбонат- и бикарбонат-ионов берут пипеткой 2 мл отфильтрованной пробы, разбавляют до 100 мл в колбе для титрования дистиллированной водой, не содержащей карбонатов, и титруют с индикатором соляной кислотой (см. методику далее).

– Для анализа различных форм азота и фосфора используют колориметрические методики. При этом предварительно пробу разбавляют в три этапа по следующей схеме:

а) Для анализа NH_4^+ -ионов берут пипеткой 2.5 (5.0) мл отфильтрованной пробы и в мерной колбе на 50 мл доводят до метки дистиллированной водой, т.е. разбавляют пробу в 20 (10) раз.

б) Для анализа PO_4^{3-} -ионов из разбавленной в 20 (10) раз пробы берут пипеткой 5 мл и в мерной колбе на 50 мл доводят до метки дистиллированной водой, т.е. разбавляют пробу в 200 (100) раз.

в) Для анализа NO_2^- и NO_3^- -ионов разбавляют пробу далее, т.е. берут пипеткой из разбавленной пробы 2-го этапа 10 мл и разбавляют в мерной колбе на 50 мл дистиллированной водой до 50 мл, т.е. получают общее разбавление 1000 (500) раз.

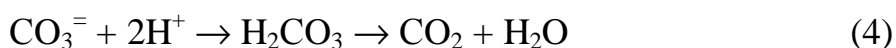
Далее все определения проводят по методикам, приведенным ниже.

Определение карбонат - и гидрокарбонат-ионов в растворах

Для определения карбонат- и гидрокарбонат-ионов в питательной среде используется метод, принятый для определения свободной и общей щелочности в

природных водах и заключающийся в титровании пробы сильной кислотой, количество которой эквивалентно содержанию карбонатных и гидрокарбонатных ионов.

Для того, чтобы избежать ошибки, вызванной присутствием катионов щелочных и щелочно-земельных металлов, связанных с анионами других слабых и средних кислот, например, $\text{HPO}_4^{=}$, H_2PO_4^- , содержащихся в растворе, следует оценить их влияние на величину общей щелочности и вносить поправку при расчетах. Эта поправка для питательной среды, используемой при культивировании *Arthrospira/Spirulina platensis*, составила 0,945. При титровании сильной кислотой карбонатов и гидрокарбонатовидут следующие реакции:



Из кривых равновесия $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- , CO_2 следует, что карбонатная щелочность определяется титрованием сильной кислотой до $\text{pH}=8,3$ (индикатор фенолфталеин), общая щелочность – карбонаты и бикарбонаты в сумме – титрованием до $\text{pH}=5$ (смешанный индикатор). При добавлении избытка кислоты до $\text{pH}=3$ переход в CO_2 происходит количественно; образовавшийся CO_2 удаляется из пробы продуванием очищенным от CO_2 воздухом или кипячением пробы. Избыток кислоты оттитровывают раствором буры со смешанным индикатором до $\text{pH}=5$.

Для очистки воздуха от CO_2 его пропускают через стеклянную трубку длиной 50 см, диаметром 2-2.5 см (или дрексельный сосуд), заполненную натронной известью или аскаритом и гранулированным хлористым кальцием. Для контроля очистки воздуха, его следует пропустить через раствор $\text{Ba}(\text{OH})_2$, который не должен при этом мутнеть.

Метод определения HCO_3^- очень точен. Относительная погрешность не превышает 0.5%. Результаты получают в мг-экв/л или мг/л. Определению мешает мутность пробы, поэтому перед анализом пробу следует отфильтровать, а при интенсивной окраске пропустить через активированный уголь.

Приготовление реактивов.

Раствор 0.05н соляной кислоты готовят из фиксанала 0.1н кислоты, переводя раствор в мерную колбу на 2 л дистиллированной водой.

Основной раствор буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 0.05н готовят растворением 4.7672 г трижды перекристаллизованного препарата $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ в бидистиллированной воде в мерной колбе на 500 мл. Раствор буры может менять нормальность при длительном хранении и его следует проверять или заменять.

Смешанный индикатор готовят следующим образом: 0.5 г метилового красного растворяют в 100 мл этилового спирта и добавляют 4 мл 1% водного раствора метиленового голубого. Раствор должен иметь малиновый цвет в кислой среде и желто-зеленый в щелочной среде.

Фенолфталеин готовят растворением 0.5 г фенолфталеина в 50 мл 96% этилового спирта, после чего доводят общий объем до 100 мл дистиллированной водой.

Определение CO_3^{2-} или карбонатной щелочности.

При высокой щелочности берут несколько мл пробы (2-5 мл), помещают в коническую колбу, разбавляют прокипяченной в течение 30 минут дистиллированной водой до 100 мл, прибавляют 0.1 мл (несколько капель) индикатора фенолфталеина, при этом раствор окрашивается в ярко малиновый цвет и титруют на белом фоне 0.1н или 0.05н раствором HCl до обесцвечивания раствора. При электрометрическом титровании титруют до $\text{pH}=8,3$. Карбонатную щелочность рассчитывают по формуле:

$$A = \frac{2nN1000}{V} \quad (5)$$

мг-экв/л. Здесь n - количество мл HCl , пошедшее на титрование пробы, N – нормальность раствора HCl , V - объем пробы. Концентрацию CO_3^{2-} в г/л получают умножением A на 30/1000.

Определение общей щелочности и гидрокарбонат-ионов HCO_3^- .

Гидрокарбонат-ионы определяют как разницу между общей щелочностью и карбонатной щелочностью. Для определения берут 2-5 мл пробы, помещают в коническую колбу, разбавляют прокипяченной дистиллированной водой до 100

мл, добавляют 5 капель смешанного индикатора (желтая окраска в щелочной среде) и приливают из бюретки 0.05н HCl до появления малиновой окраски, а затем сверх этого еще 1-2 мл HCl, чтобы создать кислую реакцию. Затем 10 минут продувают раствор очищенным воздухом для удаления образующегося в результате реакции углекислого газа CO₂; через 10 минут, не прекращая продувки, оттитровывают избыток HCl титрованным раствором буры 0.05н до перехода окраски раствора в желто-оранжевый цвет. Общую щелочность HCO₃⁻ и CO₃⁼ рассчитывают по формуле:

$$B = \frac{(n_1 N_1 - n_2 N_2) * 1000}{V} \quad (6)$$

мг-экв/л, где n₁ – количество мл израсходованной HCl; N₁ – нормальность HCl; n₂ – количество мл израсходованной буры; N₂ – нормальность буры; V – объем пробы.

Концентрацию гидрокарбонат-ионов HCO₃⁻ определяют как разницу между общей щелочностью и карбонатной щелочностью C = (B - A), мг-экв/л. От мг-экв/л можно перейти к кг/л HCO₃⁻, умножив C на 61/1000 или к кг/л NaHCO₃, умножив C на 84/1000.

Упрощенный расчет содержания NaHCO₃ в среде.

Упрощенный расчет содержания NaHCO₃ в среде можно осуществлять по следующей формуле:

$$NaHCO_3 = \frac{(n_1 - n_2 - 2n) * 0,05 * 1000 * 84}{V * 1000} \quad (7)$$

г/л, где n₁ – количество мл HCl, пошедшее на титрование CO₃⁼ и HCO₃⁻ со смешанным индикатором; n₂ – количество мл буры, пошедшее на обратное титрование избытка HCl; n – количество мл HCl, пошедшее на титрование CO₃⁼ с фенолфталеином; V – объем пробы в мл; 0.05 – нормальность растворов HCl и буры; 84 – молекулярный вес NaHCO₃.

При V = 2 мл получаем:

$$NaHCO_3 = (n_1 - n_2 - 2n) * 2,1 \quad (8)$$

Метод определения общей щелочности прямым титрованием (без использования раствора бургы)

Определение общей щелочности может быть упрощено и сведено к прямому титрованию пробы 0.05н или 0.1н HCl со смешанным индикатором, метиловым красным или метилоранжевым до перехода от щелочной среды к кислой. Титрование ведут при продувке очищенным воздухом и оставляют продувать на 10 минут после достижения эквивалентной точки. Через 10 минут раствор дотитровывают.

Общую щелочность HCO_3^- и CO_3^{2-} рассчитывают по формуле:

$$\frac{nN * 1000}{V} \quad (9)$$

мг-экв/л, где N – нормальность израсходованной HCl, n – количество мл израсходованной HCl, V – объем пробы, мл. Для определения содержания гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) из полученного значения общей щелочности следует вычесть значение карбонатной щелочности.

Определение концентрации нитрат-ионов в ультрафиолетовой области

Этот метод предложен F.Randow в 1978 г. для анализа нитратов в поверхностных водах в Уф-области на самопишущем приборе Specord UV VIS (Карл Цейс, Йена), при этом помехи, вызываемые поглощением УФ-излучения природным органическим веществом в диапазоне длин волн 200-240 нм, устраняются методом экстраполяции.

Определение NO_3^- -иона производят по максимуму поглощения при длине волны 205 нм. При высоких концентрациях нитратов кювету 1 см заменяют на кювету 0,5 или 0,2 см или разбавляют анализируемый раствор бидистиллятом. При отсутствии влияния растворенной органики метод позволяет определять от 0.2 до 2.0 мгN/л. Ошибка измерения 5-10% отн.

В качестве мешающих примесей, поглощающих в УФ-области названы такие органические соединения как: кислоты, в том числе гуминовые и фульвокислоты, альдегиды, кетоны, амины, нитросоединения, сульфокислоты, фенолы, и неорганические вещества: NaNO_2 , Na_2CO_3 , Br - ионы, присутствие которых препятствует анализу морских вод.

Для определения возможности использования данной методики при анализе питательной среды для фотосинтеза микроводорослей была проведена проверка влияния компонентов среды на поглощение в УФ - области. Получены следующие результаты:

– Бикарбонат натрия NaHCO_3 в концентрации 0,15-0,20 г/л не оказывает влияния на определение нитратов. Такая концентрация соответствует 100-кратному разбавлению среды Заррук'а (16,8 г/л NaHCO_3 в полной среде)

– Двухзамещенный фосфат калия K_2HPO_4 содержится в среде Заррук'а в концентрации 0,5 г/л, влияние этого компонента перестает сказываться при концентрации 0,05-0,10г/л, что соответствует 5-10-кратному разбавлению. Другие компоненты исходной питательной среды не дают поглощения в УФ-области.

Концентрация нитратов в питательной среде должна поддерживаться на уровне 400-200 мгN/л, что требует разбавления пробы для анализа в 400-200 раз; при этом разбавлении влияние органики, которая могла образоваться в процессе фотосинтеза в инокуляте, перестает сказываться.

В процессе фотосинтеза микроводорослей образуются нитриты, поглощающие УФ-излучение в той же области, что и нитраты (с максимумом поглощения при 210 нм). Для вычисления содержания NO_3^- -ионов следует определить NO_2^- -ионы колориметрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил) этилендиамином и вычесть эту величину из суммы нитрат- и нитрит-ионов, определенных в УФ-области, произведя предварительно пересчет для NO_2^- -ионов по схеме, приведенной в ходе определения. Возможность применения методики проверялась нами методом добавки стандартного раствора к фильтрату инокулята из фотоблока.

Ход определения

Раствор инокулята после фильтрации и разбавления помещают в кварцевую кювету 1 см фотоколориметра, спектрофотометра против бидистиллированной воды и снимают кривую поглощения при 200-250 нм. Измеряют оптическую плотность D_{205} и вычитают значение $C_{\text{NO}_2^-}$, определенное фотоколориметрическим методом. Для расчета предлагается формула:

$$C_{\text{NO}_3^-} = (D_{\text{общ.}} - C_{\text{NO}_2^-} / K_{\text{NO}_2^-} * n) K_{\text{NO}_3^-} * n \quad (.10)$$

где $D_{\text{общ}}$ – величина поглощения при 205 нм, n - кратность разбавления, $K_{\text{NO}_3^-}$ – калибровочный коэффициент для NO_3^- при 205 нм, равный 1.4, $K_{\text{NO}_2^-}$ – калибровочный коэффициент для NO_2^- при 205 нм, равный 2.1, $C_{\text{NO}_2^-}$ – концентрация NO_2^- , определенная фотоколориметрическим методом.

При низких концентрациях $C_{\text{NO}_2^-}$ и высоких концентрациях $C_{\text{NO}_3^-}$ можно пользоваться упрощенной формулой:

$$C_{\text{NO}_3^-} = D_{\text{общ.}} * n * K_{\text{NO}_3^-} - C_{\text{NO}_2^-} \quad (11)$$

Построение калибровочной кривой NO_3^-

Основной стандартный раствор KNO_3 готовят, растворяя 0,9020 г высушенного реактива в дистиллированной воде в мерной колбе на 500 мл, и получают раствор 1, содержащий 250 мгN/л. Рабочий раствор 2 готовят из 2 мл 1 раствора в мерной колбе на 50 мл и получают раствор, содержащий 10 мгN/л. Калибровочные растворы готовят в колбе на 50 мл из 2 раствора, последовательно беря пипеткой 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 мл, при этом получают шкалу с содержанием азота в растворах 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.4, 2.0 мгN/л.

На самопишущем приборе Specord UV VIS или СФ-102 снимают кривые поглощения в УФ-области от 200 до 250 нм, помещая стандартные растворы в кварцевые кюветы 1 см и измеряя оптическую плотность D при 205 нм. Строят калибровочный график зависимости D от C , проводят через экспериментальные точки и начало координат прямую и определяют коэффициент

$$K_{\text{NO}_3^-} = C/D \quad (12)$$

Он равен обычно 1.4, если концентрация "С" выражена в мгN/л, или 6.3, когда "С" выражена в мг NO_3^- /л.

Построение калибровочной кривой NO_2^-

Основной стандартный раствор (1) NaNO_2 содержит 250 мгN/л. Его готовят из 0,6157г высушенного реактива NaNO_2 х.ч., который растворяют в дистиллированной воде в мерной колбе на 500 мл. Рабочий раствор (2) стандарта с содержанием 10 мгN/л готовят из 2 мл 1 раствора, разбавляя их в мерной колбе на 50 мл дистиллированной водой. Из этого раствора готовят шкалу для калибровочного графика. Для шкалы берут последовательно 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 мл 2 раствора в мерную колбу на 50 мл и получают растворы с содержанием азота 0.2, 0.4, 0.6, 0.8

мгN/л. Снимают шкалу на приборе Specord UV VIS или СФ-102 в УФ-области и строят калибровочный график зависимости D_{205} от C_{NO_2} , мгN/л, вычисляют $K_{NO_2} = C/D_{205}$ (он равен обычно 2.1).

Колориметрическое определение фосфатов $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}

Метод основан на образовании комплексной фосфорно-молибденовой кислоты $H_7[P(Mo_2O_7)_6] \cdot 28H_2O$, которая в сильноокислом растворе восстанавливается аскорбиновой кислотой в присутствии сурьмяновиннокислого калия (рвотный камень) до голубого фосфорномолибденового комплекса. Метод позволяет определять без разбавления до 0,1 мгP/л. Чувствительность метода 0,005 мгP/л. Точность определения 5-10%.

Приготовление реактивов.

– Раствор молибдата аммония $(NH_4)_2MoO_4$ или $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ готовят, растворяя 15 г соли в 0,5 л дистиллированной воды (хранят в холодильнике).

– Разбавленная серная кислота H_2SO_4 . К 900 мл дистиллированной воды добавляют 140 мл концентрированной H_2SO_4 х.ч. или о.с.ч.

– Раствор аскорбиновой кислоты. Растворяют 13,5 г кислоты в 250 мл

– дистиллированной воды (хранят в холодильнике).

– Раствор сурьмяновиннокислого калия $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 0,5 H_2O$. 0,34 г соли растворяют в 250 мл дистиллированной воды (хранят в холодильнике).

– Основной стандартный раствор (1) готовят из 0.1757 г KH_2PO_4 однозамещенного фосфорнокислого калия (х.ч.), высушенного до постоянного веса, растворяя навеску в 1 л дистиллированной воды, что соответствует содержанию 40 мгP/л.

– Приготовление смешанного реактива-100 мл. Смешивают растворы: 20 мл 1 - молибдата аммония, 50 мл 2 - разбавленной серной кислоты, 20 мл 3- аскорбиновой кислоты, 10 мл 4 - рвотного камня (раствор годен в течение рабочего дня).

Ход определения.

В цилиндры наливают по 10 мл фильтрованной разбавленной в 200 (100-400) раз пробы (природную воду - без разбавления). Пипеткой добавляют по 1 мл смешанного реактива, встряхивают для равномерного смешивания пробы с реактивом, выдерживают не менее 10 мин и измеряют оптическую плотность окрашенного раствора против дистиллированной воды в кювете 1 см. При измерении на СФ-26 или СФ-102 выставляется длина волны 882 нм, фильтр "К", при измерении на фотоколориметрах длина волны – 750 нм. На шкале оптической плотности отмечается величина отклонения D. Концентрацию P мг/л рассчитывают по формуле:

$$C_{1,2,..} = D_{1,2,..} * K * n , \quad (13)$$

где K - коэффициент, полученный при построении калибровочного графика при соответствующей длине волны; n – кратность разбавления пробы. Оптимальный интервал измерения D = 0.1-0.4.

Построение калибровочной кривой

Для построения калибровочной кривой берут 10 мл основного стандартного раствора 1 в колбу на 100 мл и получают рабочий стандартный раствор 2 с содержанием 4 мг P/л.

В мерные колбы на 50 мл отбирают пипеткой 1.0, 2.5, 4.0, 5.0, 6.0, 7.5, мл 2 стандартного раствора и объем доводят до метки дистиллированной водой. В полученном ряду стандартных растворов с концентрациями 0.08, 0.20, 0.32, 0.40, 0.48, 0.60 мг P/л производят определения оптической плотности при длине волны 882 нм на СФ-26 или СФ-102 или 750 нм на фотоколориметре, для чего берут 10 мл раствора, добавляют 1 мл смешанного реактива и определяют $D_{1,2,..}$ (см. ход определения). Из полученных значений $D_{1,2,..}$, измеренных против дистиллированной воды вычитают D холостой пробы (дистиллированная вода со смешанным реактивом) и строят калибровочный график, откладывая по оси абсцисс концентрацию фосфатов "С" в мг P/л, а по оси ординат - оптическую плотность "D"; через полученные точки и пересечение координат проводят прямую и определяют "K" как отношение C/D.

Лабораторная работа №17

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЛИПИДОВ ПРИ ПЕРВИЧНОМ СКРИНИНГЕ ЛИПИДООБРАЗУЮЩИХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

Коробкова Т.П.

Цель работы: показать возможность использования суданового красителя В (черный) для первичного скрининга микроводорослей, аккумулирующих липиды.

Задача работы: обнаружение липидосодержащих микроводорослей в природных источниках.

Принадлежности: 1) проба фитопланктона из природного источника, 2) микроскоп Биомед-5 (Ломо), 3) бинокулярная лупа МБС-9, 4) Судан красный, Судан черный В, 5) чашки Петри с агаровой средой BG-11, 6) предметные и покровные стекла, 7) препаровальная игла, 8) микрокапилляры, 9) фильтровальная бумага.

Описание объектов исследований

В последние годы интерес к липидам микроводорослей обусловлен их высоким потенциалом в качестве сырья для фармацевтической, химической и пищевой промышленности. Липиды, выполняющие важные функции в живом организме, можно разделить на две ключевые группы: полярные и неполярные (нейтральные). Полярные липиды (фосфо- и гликолипиды) являются важными структурными компонентами мембран и органоидов клетки, а также выполняют сигнальную функцию, являясь сигнальными молекулами или их предшественниками. Среди нейтральных липидов триацилглицерины (ТАГ) являются наиболее распространенной группой запасных веществ, легко вовлекаемых в катаболизм для получения необходимой клетке энергии.

Полярным липидам микроводорослей изначально уделялось больше внимания исследователей, поскольку изменения их качественного и количественного состава тесно связаны с состоянием мембран хлоропластов. Однако в последнее время значительно вырос интерес к ТАГ микроводорослей благодаря признанию их в качестве сырья для производства биотоплива третьего и четвертого поколе-

ний. Использовать микроводоросли как источник транспортного топлива впервые предложили Oswald W.J., Golueke C.G., и с 1970 г в ряде стран (США, Япония, Австралия) были осуществлены исследовательские программы по созданию биотоплива на основе липидов из микроводорослей .

Определяющим моментом использования водорослей для получения биотоплива является высокое липидное содержание в них, особенно неполярных ТАГ, являющихся лучшим источником для получения биотоплива, но, главное, возможность управлять накоплением их путем изменения условий культивирования. Общее содержание липидов в микроводорослях обычно варьирует от 1-85% сухого веса, причем выше 40% обычно получается в условиях дефицита биогенов. Такие факторы как освещение, температура, состав питательной среды оказывают влияние на липидное содержание и липидную композицию во многих водорослях.

Синтезированные нейтральные липиды (ТАГ) откладываются в виде цитоплазматических включений сферической формы олеосомах или липидных глобул (oil bodies). В некоторых случаях наблюдается образование липидных глобул в межтилакоидном пространстве.

Поиск продуцентов липидов среди микроводорослей имеет свои особенности. Он зависит от наличия методов внутриклеточного выявления липидов и их количественного определения. Методы определения липидов в клетках микроводорослей можно разделить на две категории:

I. Методы, основанные на использовании липофильных, в том числе флуоресцентных, красителей *in situ* без экстракции липидов из клетки, осуществляемые:

а) микроскопически, с использованием микроскопов соответствующих конструкций (световых, эпифлуоресцентных и др.), что может рассматриваться скорее, как качественный анализ;

б) спектрофлуометрически, с использованием липидных стандартов, что является количественным методом определения.

II. Методы, предусматривающие экстракцию липидов органическими растворителями, согласно которым количество липидов определяется гравиметрическим или спектральными методами.

Традиционным методом для определения липидов является экстракция органическими растворителями и последующее их гравиметрическое определение с дальнейшим выделением нейтральных липидов методами тонкослойной хроматографии, либо газо-жидкостной хроматографии и масс-спектрометрии. Эти методы липидного анализа требуют больших количеств биомассы микроводорослей и уверенности в полной экстракции липидов, так как имеется опасность разрушения и/или окисления их. Кроме того, большие временные и рабочие затраты делают этот метод неприемлемым для массового скрининга продуцентов липидов.

Спектральные методы определения липидов в экстрактах микроводорослей: колориметрический сульфо-фосфо-ванилиновый метод, разработанный для количественного определения общих липидов в очищенных экстрактах из микроводорослей, и метод NIR-спектроскопии более точны и экспрессны, но требуют дорогостоящего оборудования и высокой квалификации персонала. В настоящее время *in situ* в альгологии применяются селективные флуоресцентные липофильные красители: нильский красный (Nile Red) (9-этиламино-5Н – бензо [а]феноксазин-5-один) [25-27] и BODIPY (4,4-дифлюоро-1,3,5,7,8,-пентаметил-4-бора-3а,4а-диаза-s- индацин).

Стандартная схема работы с отобранными в природе пробами из водоемов, почвы и других объектов состоит в их рассеивании на плотные питательные среды для тотального выделения отдельных колоний, последующего выращивания их на жидких питательных средах с целью определения их продуктивности по биомассе и целевым продуктам. Для выделения отдельных клеток микроводорослей применяют автоматический проточный цитометрический клеточный анализатор, принцип работы которого основан на двумерном распределении клеток микроводорослей по красной флуоресценции, автофлуоресценции хлорофилла против прямого светорассеяния, отражающего клеточный размер, и красной флуоресценции против зеленой. Изолированные с помощью такого

анализатора клетки микроводорослей переносят в жидкую питательную среду в микропланшеты для подращивания и используют в дальнейшей работе по описанной выше схеме. Это, безусловно, прогрессивный метод, однако высокая стоимость прибора и необходимость привлечения специально подготовленного к работе с прибором оператора затрудняет его широкое применение.

Практика тотального выделения микроводорослей из природных образцов с последующим анализом липидного содержания описанными выше методами является длительной и/или затратной процедурой, может быть сокращена за счет введения предварительной качественной оценки, или первичного скрининга, содержания липидов в микроводорослях из исследуемых проб. В основу такой оценки можно положить окрашивание проб из природных источников специфичным для липидов судановыми красителями, чья растворимость в жире превышает их растворимость в растворителе. Они обладают некоторыми отличиями: красные суданы (судан III и судан IV) окрашивают жиры, масла, свободные жирные кислоты в цвета от оранжевого до красного и не окрашивают фосфолипиды. Судан черный В обладает лучшими красящими свойствами, чем красные суданы, и окрашивает все клеточные липиды, в том числе и фосфолипиды в темно-синий цвет. Судан черный В был использован при отборе дрожжей и грибов - продуцентов липидов.

Метод первичного скрининга липидосодержащих микроводорослей, включает в себя следующие основные стадии:

1) микроскопирование образцов микроводорослей, выделенных из природных источников;

2) окрашивание судановыми красителями параллельных проб из того же источника – качественная оценка липидосодержащих культур;

3) выделение с помощью микрокапилляра из той же нативной пробы интенсивно окрашиваемых микроводорослей на плотные питательные среды для получения альгологически чистых культур. Уже на этом этапе отбора можно выявить быстро и медленно растущие культуры;

4) выращивание отобранных штаммов микроводорослей на унифицированной и модифицированной жидкой питательной среде BG-11 с целью определения

содержания липидов в них для сопоставления качественных и количественных результатов предложенной методики.

Состоятельность этого метода была подтверждена рядом исследований, результаты которых представлены на рис.1,2,3,4 и в таблице №1, где дано сравнение результатов качественного первичного скрининга липидосодержащих микроводорослей и количественного содержания липидов в отобранных на первом этапе перспективных культур.

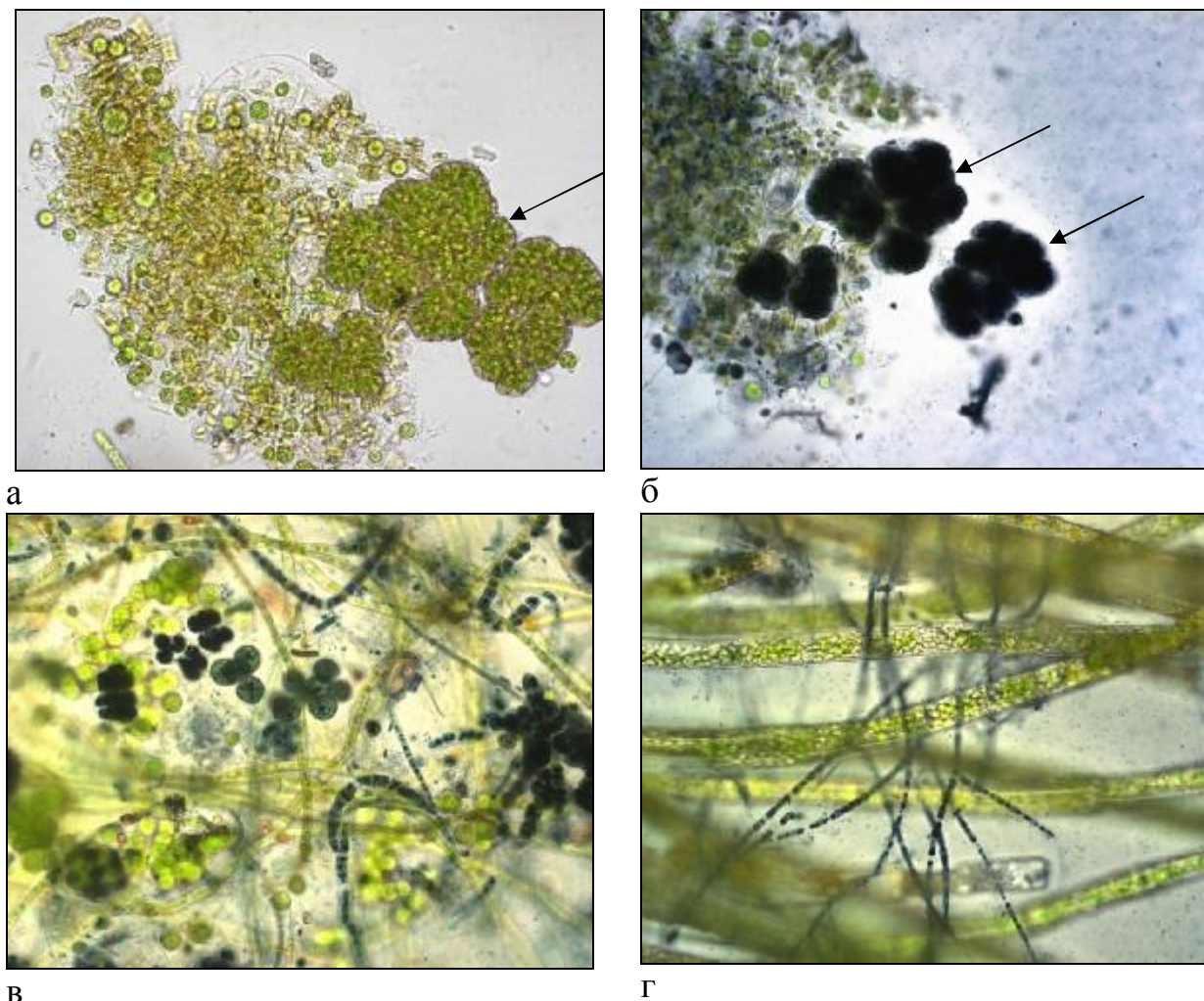


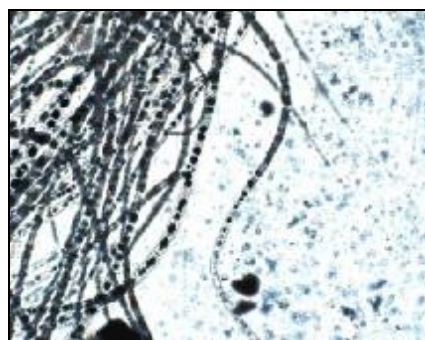
Рисунок 1 – Примеры окраски пробы фитопланктона из озера Шлино: а - нативный препарат (стрелкой указана колониальная микроводоросль *Botryococcus* р.); б – та же проба, окрашенная суданом черным В; в, г – другие пробы фитопланктона, окрашенные суданом черным В.

На рисунке 1а представлена микрофотография нативной пробы фитопланктона из озера Шлино (Валдай). Стрелкой отмечены колонии микроводоросли *Botryococcus* sp. – известного продуцента значительного количества липидов. На

этой микрофотографии также видны представители одноклеточных микроводорослей. На рисунке 1б видны те же колонии *Botryococcus sp* (указаны стрелками), хорошо прокрашенные суданом черным В, а также ряд других микроводорослей, окрашенных этим красителем. Избирательность судана черного В при окрашивании микроводорослей, содержащих липиды, подтверждается микрофотографиями, представленными на рисунках 1в и 1г. Видно, что сродство к красителю определяется лишь у некоторых микроводорослей.



а



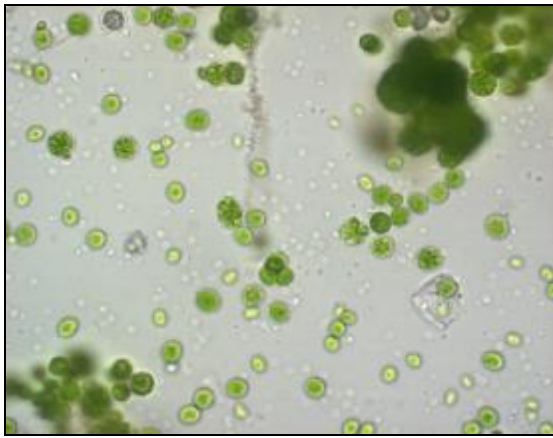
б



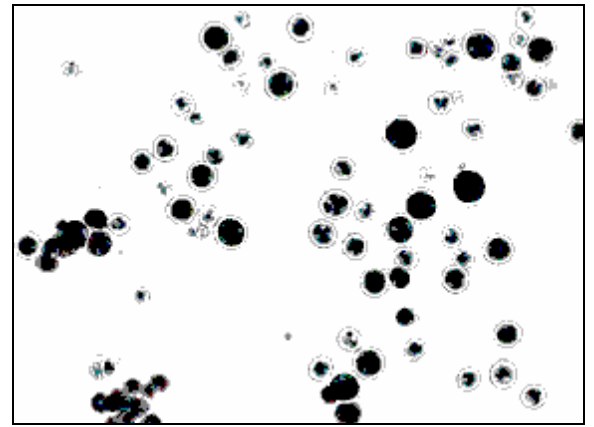
в

Рисунок 2 – Культура Shl-3/2011 в нативном состоянии (а),окрашенная суданом черным В (б) и суданом III (в).

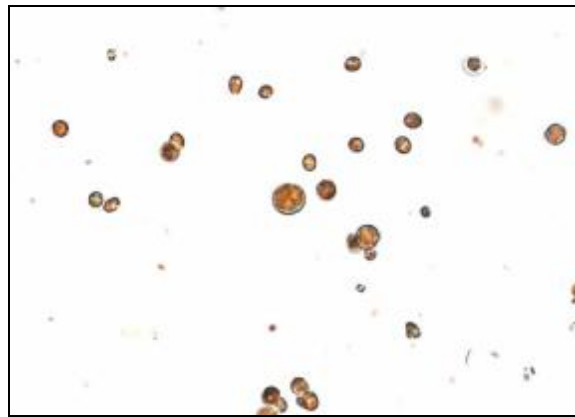
На рисунках 2а, 2б, 2в представлены микрофотографии культуры Shl-3/2011, отнесенной по результатам проведенных исследований к роду *Stigeoclonium*, в естественном состоянии (а), окрашенной суданом черным В (б) и суданом III (в). В этой нитчатой многоклеточной микроводоросли липидные гранулы отчетливо выявляются под действием обоих красителей, что свидетельствует о том, что окрашивание суданом черным В не связано с присутствием только фосфолипидов, ибо судан III их не окрашивает. Аналогичная картина наблюдается при окрашивании водоросли Shl- Vb/2010 двумя красителями (рисунках 3 а, б, в), также КК-7/2010.



а



б



в

Рисунок 3 – Культура Shl- Bb/2010 в нативном состоянии (а), окрашенная суданом черным В (б) и суданом III (в).

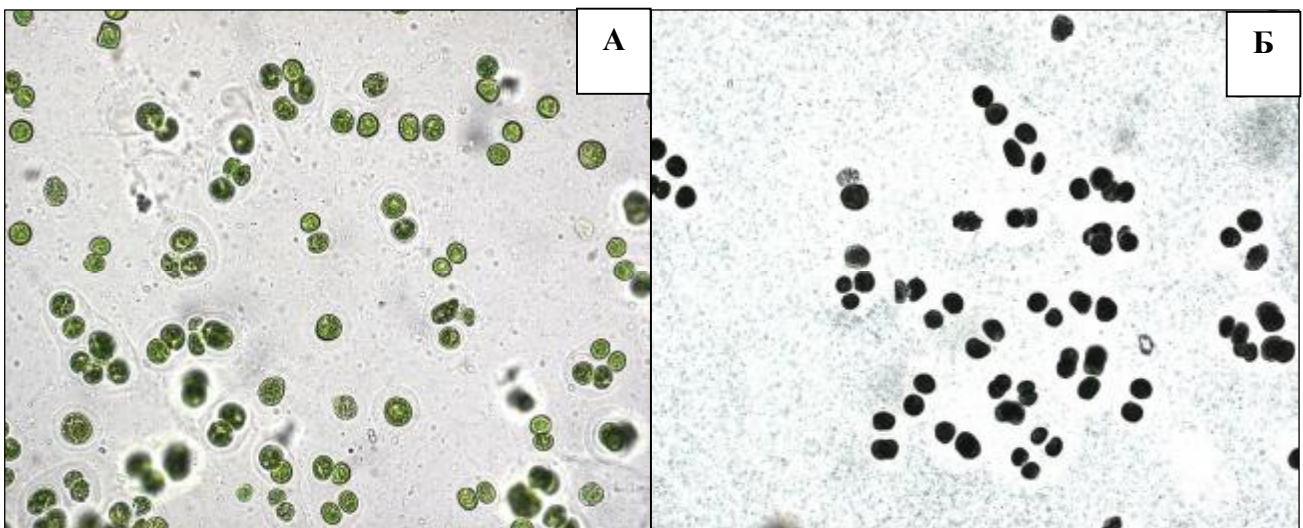


Рисунок 4. – Штамм микроводоросли КК-6/2010: а – в нативном состоянии; б – окраска суданом черным В.

Таблица 1. Сопоставление результатов первичного скрининга (окрашивание суданом черным) и количественного определения липидов.

№ п/п	Название микроводорослей	Результаты первичного скрининга	Содержание липидов, % от сух. веса биомассы
1	Шт. Sh1-b/2010 на среде BG-11	+	23,6%
2	Шт. Stigeoclonium sp. на среде BG-11	+	22,0%
3	Шт. Nannochloropsis sp. на среде BG-11	+	25,0%
4	КК-6/2010 на среде BG-11	+	62,9%

Таким образом, показано, что использование судана черного В для качественного определения липидов в клетках микроводорослей дает возможность выявить уже в пробах из природных источников потенциальных продуцентов липидов без тотального выделения всех культур, что существенно сокращает объем работы.

Порядок проведения работы

1. Приготовить 1% раствор судана черного В в смеси равных объемов 96% спирта и глицерина; отфильтровать.
2. На предметное стекло нанести каплю образца из природного источника (водоем, почва, обрастание).
3. Удалить избыток влаги фильтровальной бумагой.
4. Нанести раствор судана черного В на каплю образца, накрыть покровным стеклом, окрашивать в течение 10-30 минут.
5. Удалить избыток краски фильтровальной бумагой и быстро промыть 50%-ным спиртом, не снимая покровное стекло.
6. Посмотреть под микроскопом препарат, найти клетки (нити, колонии), содержащие гранулы липидов, окрашенных в темно-синий или черный цвет.
7. В параллельной пробе из того же образца под микроскопом (бинокулярной лупой) найти похожие клетки (нити, колонии), с выявленными при окрашивании липидами, и с помощью препаровальной иглы или микрокапил-

ляра провести их через серию капель воды на предметном стекле до выделения одиночной клетки (нити, колонии).

8. Изолированную таким образом клетку (нить, колонию) перенести на агаризованную питательную среду в чашку Петри для получения хорошо выросшей колонии, используемой в дальнейшем для количественного определения липидов.

9. Подготовить отчет по работе, в котором описать качественные результаты определения липидов с помощью красителей, основываясь на том, что Судан черный В окрашивает липидные гранулы в микроводорослях в темно-синий до черного цвет, что позволяет рассматривать их в качестве продуцентов липидов, используемых в производстве биодизеля.

Контрольные вопросы

1. Что такое липиды?
2. Какой вид биотоплива производится из липидосодержащей биомассы микроводорослей?
3. Какие имеются методы определения липидов в микроводорослях?
4. На чем основан цитохимический метод выявления липидов?
5. Принцип окрашивания липидов с использованием суданов.
6. В чем суть первичного скрининга липидообразующих микроводорослей?

Рекомендуемая литература

1. Барыкина Р.П., Веселова Т.Д. Справочник по ботанической микротехнике. Основы и методы. М.: Изд-во МГУ, 2004. С.114-117.
2. Дженсен У . Ботаническая гистохимия. М.: Изд-во «Мир», 1965. С. 245-249.

**Возобновляемые энергоресурсы
атмосферы, гидросферы, биосферы:**

Лабораторный практикум

Под ред. А.А. Соловьева

Авторы-составители:

Андреевко Т.И., Берёзкин М.Ю., Зайцев СИ.,
Киселева СВ., Коробкова Т.П., Нефедова Л.В.,
Рафикова Ю.Ю., Соловьев А.А., Чернова Н.И.

Компьютерная верстка: *М.Ю.Берёзкин*

Подписано к печати 27.11.2013. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная №1. Гарнитура Times New Roman
Печ. л. 9,07. Тираж 200 экз. Заказ № Т-307-13
Отпечатано в типографии «КДУ»
Тел./факс (495) 638-57-34;
www.kdu.ru; e-mail: press@kdu.ru