

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 5 № 2

**Севастополь
2019**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2019. – Т. 5. - № 2. – 116 с.: ил.

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из разделов: тепловые и ядерные энергетические установки, электротехнические комплексы и системы, экологическая безопасность, химические технологии атомных станций, информационные технологии в энергетике, моделирование физических процессов, физика в ядерной энергетике, автоматизация процессов контроля и управления, судовые энергетические установки, холодильные установки, гидравлические энергоустановки, компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Редакционная коллегия:

Качур С.А. (главный редактор), д.т.н., доцент;
Омельчук Ю.А. (заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
Черкашина Н.И. (ответственный секретарь), к.т.н., доцент;
Сафонов В.А., д.т.н., профессор; *Пухлий В.А.*, д.т.н., профессор;
Пучков В.Н., д.т.н., профессор; *Акимов А.М.*, д.т.н., профессор;
Федоровский К.Ю., д.т.н., профессор; *Олейников А.М.*, д.т.н., профессор;
Тимошенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б.*, д.т.н., профессор;
Высоцкий В.Е., д.т.н., профессор; *Краснодубец Л.А.*, д.т.н., профессор;
Прибатурин Н.А., д.т.н., профессор; *Кирияченко И.А.*, к.т.н., профессор;
Магдых Е.А., к.т.н., доцент; *Федорова С.А.*, к.пед.н., доцент;
Мирошниченко С.Т., к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.*, к.т.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.*, к.т.н., доцент;
Углов А.В., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М.*, к.т.н., доцент;
Ерофеев В.А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И.*, к.т.н., доцент;
Гусева Е.В., к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.*, д.х.н., доцент

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Качур С.А.</i> Волны искривления пространства монополя реактора как частный случай гравитационных волн	5
<i>Пухлий В.А., Семенов Е.С.</i> Воздействие температурных и радиационных полей на напряженно-деформированное состояние крышек ядерных реакторов типа ВВЭР	11
<i>Пухлий В.А., Пухлий К.В.</i> Гидродинамическая акустика. Сообщение 4. Уравнения движения маловязкой жидкости. Уравнения гидродинамической акустики	23
<i>Широков И.Б., Марончук И.И.</i> Современное состояние развития основных типов неатомных анаэробных двигательных и энергетических установок (обзор)	37
Электротехнические комплексы и системы	51
<i>Гусева Е.В., Шалимов А.Ю., Богомолов А.Ю., Михненко А.В., Дыгаль А.В.</i> Развитие ветроэнергетики в России и Крыму	51
<i>Канов Л.Н., Кутовой Н.С.</i> Совершенствование защиты трансформатора от короткого замыкания на основе спектрального анализа тока	56
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	61
<i>Абдали Лаит Мохаммед А., Аль-Руфайи Ф.М., Якимович Б.А., Кувишинов В.В.</i> Анализ производительности гибридных фото-ветроэлектрических установок	61
<i>Аль Баурмани А.Г., Якимович Б.А., Кувишинов В.В.</i> Использование солнечной генерации в системе электроснабжения Ирака	69
<i>Аль-Руфайи Ф.М., Абдали Л.М., Кувишинов В.В.</i> Электроэнергии в Ираке: кризис и решение	74
<i>Васильев А.А., Ислямова Э.Ю., Кувишинова В.В.</i> Системные основы оценки уровня устойчивого развития регионов	80
<i>Гурьев В.В., Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувишинов В.В.</i> Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя	90
<i>Жиганов И.Г., Кувишинова В.В., Ненько А.А., Здарьев Д.С.</i> Комбинированная солнечно-биоэнергетическая установка для сельского хозяйства Республики Крым	94
<i>Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Здарьев Д.С., Михненко А.А., Дыгаль А.А.</i> Использование комбинированной термофотоэлектрической системы для автономного потребителя	99
<i>Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Кувишинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.</i> Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя	104
Химические технологии	111
<i>Акимов А.М., Котельникова С.А.</i> Мембранные технологии водоподготовки в энергетике	111

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	5
<i>Kachur S.A.</i> Curvature waves of the reactor monopole space as a special case of gravitational waves	5
<i>Pukhliy V.A., Semenov E.S.</i> Influence of temperature and radiating fields on the is intense-deformed status of covers nuclear reactors type VVER	11
<i>Pukhliy V.A., Pukhliy K.V.</i> Hydrodynamic acoustics. The message 4. The movement equations viscous liquids. The equations of hydrodynamic acoustics	23
<i>Shirokov I.B., Maronchuk I.I.</i> The current state of development of the main types of non-nuclear anaerobic motor and energy systems (review)	37
Electrotechnical complexes and systems	51
<i>Guseva Ye.V., Shalimov A.YU., Bogomolov A.YU., Mikhnenko A.V., Dygal A.V.</i> Development of the wind power engineering in Russia and Crimea	51
<i>Kanov L.N., Kutovoy N.S.</i> Perfection of Transformer defence from a Short circuit on the basis of Current spectrology	56
Alternative and renewable energy sources	61
<i>Abdali Layth Mohammed A., Al-Rufae Faez M., Yakimovich B. A., Kuvshinov V.V.</i> Analysis of Performance Hybrid PV- Wind Energy	61
<i>Albairmani A.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.</i> Use of solar generation in the distribution system of Iraq	69
<i>Al-Rufae F.M., Abdali L.M., Kuvshinov V.V.</i> Electricity in Iraq: Crisis and Solutio	74
<i>Vasilyev A.A., Islyamova E.Yu., Kuvshinova V.V.</i> System bases for assessing the level of sustainable development of regions	80
<i>Guryev V.V., Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.</i> Development of renewable sources of electric energy in the energy systems of the Republic of Crimea and g. Sevastopol	90
<i>Zhiganov I.G., Kuvshinova V.V., Nenko A.A., Zdarev V.V.</i> Combined solar-bioenergy installation for agriculture of the Republic of Crimea	94
<i>Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G., Zdaryev D.S., Mikhnenko A.A., Dygal A.A.</i> Using a combined thermophotovoltaic system for an autonomous consum	99
<i>Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G., Kuvshinova V.V., Adzhiev O.Y., Berdyshev K.Y.</i> Experimental study of the energy characteristics of solar installations in the region of Sevastopol	104
Chemical technology of nuclear power plants	111
<i>Akimov A.M., Kotelnikova S.A.</i> Membrane water treatment technologies in power	111

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Волны искривления пространства монополя реактора как частный случай гравитационных волн

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 08.04.2019 г.; после доработки 12.04.2019 г.

Аннотация

Выдвинута гипотеза о существовании искривляющих пространство волн, возникающих при переходе ядерного реактора из состояния вблизи мгновенной критичности в подкритическое состояние. Дано описание этих волн. Показано, что они являются по типу гибридными, промежуточными между электромагнитными и гравитационными и представляют собой частный случай гравитационных волн.

Ключевые слова: монополь реактора, гравитационные волны, искривление пространства, мгновенная критичность.

Curvature waves of the reactor monopole space as a special case of gravitational waves

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 08.04.2019 y.; received in final form 12.04.2019 y.

Abstract

The hypothesis of the existence of space-warping waves arising during the transition of a nuclear reactor from the state near instantaneous criticality to the subcritical state is proposed. The description of these waves is given. It is shown that they are hybrid, intermediate between electromagnetic and gravitational and represent a special case of gravitational waves.

Keywords: reactor monopole, gravitational waves, space curvature, instantaneous criticality

Введение

Пространство и время являются формами существования материи, следовательно, они обладают энергией и преобразуют ее. Управление энергией пространства-времени – это задачи будущего. Однако уже сейчас имеется достаточно фактов, позволяющих начать разработку теории управления этой энергией [1].

Первым этапом на пути использования энергии пространства является изучение его искривления вблизи ядерных реакторов, при

работе которых возникло состояние вблизи мгновенной критичности, т.е. исследование процессов предотвративших взрыва таких реакторов [1].

Волновые процессы, порождающие искривление пространства реактора, должны иметь природу схожую с природой гравитационных волн.

Необходимо определить связь между волной, искривляющей пространство монополя реактора, электромагнитной и гравитационной волной.

Представляется, что в случае формирования монополя реактора необходимо рассматривать первичные гравитационные волны [2].

Первичные гравитационные волны пришли к нам от эпохи, когда Вселенная расширялась ускоренно, и это след тех квантовых флуктуаций, которые отразились в первичных гравитационных волнах.

Источники таких волн – это не материальные тела, а именно сама стадия ускоренного расширения Вселенной приводит к появлению определенного спектра первичных флуктуаций метрики пространства-времени от частоты. Эти флуктуации отпечатываются в особенностях поляризации реликтового излучения.

Одной из задач экспериментов по измерению реликтового излучения было, в частности, попытаться обнаружить и первичные гравитационные волны.

Но дело в том, что этот эффект на несколько порядков меньше, чем флуктуации температуры микроволнового фона, которые сами составляют 10^{-5} , а эффект поляризации реликтового фона от первичных гравитационных волн еще меньше на несколько порядков. Оказывается, там есть очень много разных мешающих факторов, в частности, поляризация излучения на космической пыли может создавать очень похожие на гравитационные волны эффекты. В настоящее время нет основания утверждать, что обнаружены первичные гравитационные волны.

Главные астрофизические источники гравитационных волн – это сливающиеся двойные нейтронные звезды или черные дыры, то есть два массивных объекта, которые вращаются по орбите вокруг общего центра масс. Излучение гравитационных волн очень слабое для обычных двойных систем, например, для системы Земля – Солнце оно не играет никакой роли.

В статье исследуются волновые процессы, возникающие при создании пространственно-временного монополя ядерного реактора. Описание монополя реактора дано в [1, 3-9].

Целью исследования является описание волны, искривляющей пространство монополя реактора и определение, для отнесения его к одному из известных типов волн.

Описание волны, искривляющей пространство реактора

Искривление, вызываемое при определенных условиях реактором вблизи мгновенной критичности, не изменяет размеры и массу объектов, находящихся в этом пространстве.

Оно влияет на время и гравитационную постоянную, т.е. на ускорение силы тяжести.

Волны искривления пространства реактора уносят его энергию и переводят реактор из состояния близкого к взрыву в подкритическое состояние.

Эти волны подобны по структуре электромагнитным, поскольку они представляют две волны (времени и гравитации) взаимно перпендикулярные в выбранном пространстве метрик. На рис. 1 представлена волна искривления монополя ядерного реактора.

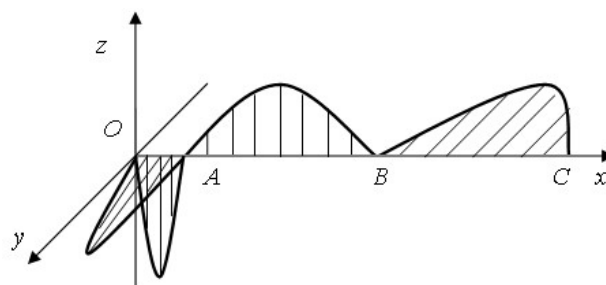


Рис. 1. Волна искривления пространства реактора. Обозначения: OA – область сжатия, AB – область задержки, BC – область расширения; оси x , y , z определяют пространство, время, гравитационную постоянную соответственно.

Масштабы по осям рис. 1 определены следующим образом

$$x: \log_{\sqrt{2}} \frac{\gamma}{\gamma_0},$$

$$y: \log_k \frac{\tau}{\tau_0},$$

$$z: \frac{r\omega_{\beta D}}{ck},$$

где γ , γ_0 – гравитационная постоянная в искривленном и исходном пространстве соответственно; τ , τ_0 – время в искривленном и исходном пространстве соответственно; k – коэффициент искривления; r – расстояние от реактора; c – скорость света; $\omega_{\beta D}$ – частота ядерного магнитного резонанса.

В реальности изменение течения времени и гравитационной постоянной происходит скачкообразно (рис. 2).

Наличие области задержки (отрезок AB на рис. 1) связано с тем, что скорость волны искривления близка к скорости света, но меньше ее, поскольку скорость физического процесса, породившего эту волну меньше скорости света. При скорости распространения равной световой

искривляющая пространство волна становится плоской гравитационной волной, поляризация пропадает, область задержки исчезает.

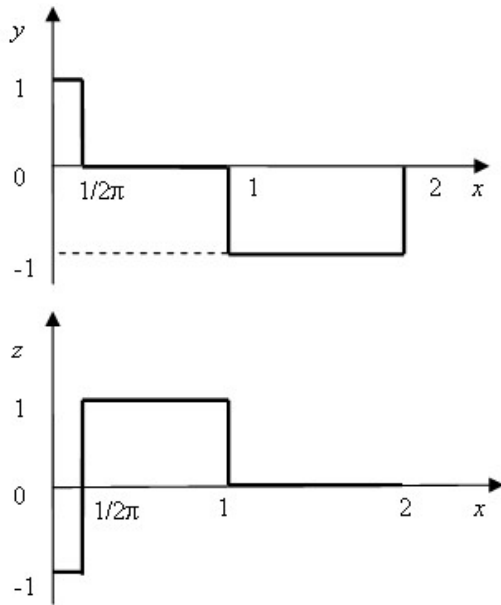


Рис. 2. Скачкообразное изменение времени и гравитационной постоянной в различных областях пространственно-временного монополя.

Гравитационная волна меняет метрику пространства-времени, но, по-существу, не искривляет пространство. В ее пространство невозможно войти. Оно параллельно любому другому пространству, поскольку иерархически выше всех существующих.

Гравитационная волна характеризует идеальное (универсальное) пространство, в котором гравитационная постоянная не меняется, поскольку скорость волны равна скорости света (т.е. невозможно изменение скорости, $\Delta c=0$) и, следовательно, отсутствует изменение ускорения силы тяжести.

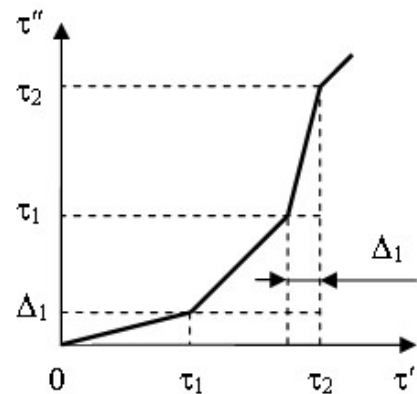
Представляется, что гравитационная волна является излучением пространства как такового и свидетельствует о его материальности.

Пространство обладает энергией.

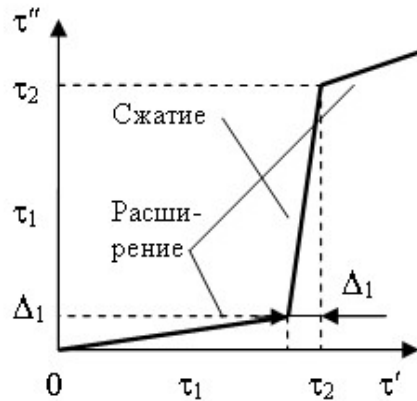
В случае превышения некоего предела этой энергии, приводящего к возможному увеличению скорости света, пространство генерирует гравитационные волны с разными метриками пространства-времени (амплитудой). При останове реактора на грани взрыва возникают гравитационные волны, происходит изменение метрики пространства, хотя в этот момент столкновения массивных космических тел, которое могло бы согласно современным представлениям породить гравитационные волны, нет.

Таким образом, искривляющая пространство волна по своему типу занимает промежуточное положение между электромагнитной и первичной гравитационной волнами. Возможно, она является гибридной, поскольку порождена ядерными, электромагнитными и гравитационными явлениями.

На рис. 3 представлено схематически изменение течения времени в различных областях монополя реактора, порожденного искривляющей пространство волной.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость между временем исходного пространства (τ') и временем искривленного пространства (τ'') для искривляющей волны (а) и гравитационной волны (б).

Покажем, что ядерные процессы реактора при порядке монополя $n=1$ вызывают уменьшение ускорения силы тяжести в $\sqrt{2}$ раз для об-

ласти сжатия и увеличение в $\sqrt{2}$ раз для области задержки.

При доказательстве объединим области расширения и задержки в одно целое, так как их разнесение в пространстве связано с величиной скорости распространения волны, а не с природой явления.

Предположим, что утверждение о характере изменения ускорения силы тяжести, верно. Поскольку в искривленном пространстве не изменяется суммарный вектор ускорения, то должно измениться ускорение силы тяжести. Тогда для расширения можно записать следующее соотношение

$$g_0^2 + a_0^2 = g_1^2 + a_1^2, \quad (1)$$

где g_0, g_1 – ускорение силы тяжести в исходном пространстве и пространстве области задержки соответственно; a_0, a_1 – ускорение при движении объекта в исходном пространстве и пространстве области расширения соответственно.

Так как волна искривления является поляризованной, то коэффициенты искривления временного поля и гравитационного поля могут быть различны. Рассмотрим искривление расширенного пространства относительно исходного с учетом коэффициентов искривления по времени k и по гравитации k_1 . Выражение (1) преобразуется следующим образом

$$g_0^2 + a_0^2 = g_0^2 / k_1^2 + a_0^2 / k^2, \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}. \quad (3)$$

Подставив в (2) выражение для k (3), получим

$$g_0 \sqrt{1/k_1^2 - 1} = a_0 \frac{V}{c}. \quad (4)$$

Для квантовой механики коэффициент искривления определяется как V/c в отличие от общей теории относительность, в которой этот коэффициент задается формулой (3), а скорость для ядерного реактора в (3) определяется соотношением [1]

$$V = \frac{c\omega_0 l}{1 + 10\beta\omega_0}$$

где ω_0 – частота реактивности, соответствующая нулевой гармонике; l – время жизни мгновенных нейтронов; β – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейтронов для ^{239}Pu .

Формирование монополя является результатом ядерных реакций. Рассмотрим V' как ско-

рость размножения нейтронов, определяемую коэффициентом усиления [10]

$$K = \frac{1}{\omega_0 l}.$$

Максимальная величина коэффициента усиления равна $K_{\max} = 3 \cdot 10^8$ и соответствует скорости света. При $\omega_0 = 0,48$ и $l = 10^{-8}$ значение $K = 2,1 \cdot 10^8$ [1].

Коэффициент искривления для поля гравитации будет определяться формулой

$$k_1 = \frac{K}{K_{\max}}. \quad (6)$$

Из выражения (2) следует, что в исходном пространстве сила тяжести относительно расширенного пространства (области задержки) должна быть больше в k_1 раз. В соответствии с (6) значение $k_1 = 1/\sqrt{2}$.

Подставляя значение k_1 в (4), получим

$$g_0 = a_0 \frac{V}{c}.$$

Это означает, что при $V=c$ гравитационная составляющая в поляризованной волне исчезает, т.к. ускорение движения эквивалентно ускорению силы тяжести, которое становится постоянным. Искривляющая волна перерождается в гравитационную.

Таким образом, доказано, что в области задержки сила тяжести в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в исходном пространстве.

Подобным образом проведем рассуждения для области сжатия.

Запишем для этой области тождество, аналогичное (1),

$$g_0^2 + a_0^2 = g_2^2 + a_2^2, \quad (7)$$

где g_0, g_2 – ускорение силы тяжести в исходном пространстве и пространстве области сжатия соответственно; a_0, a_1 – ускорение при движении объекта в исходном пространстве и пространстве области сжатия соответственно.

Если рассматривать не искривление сжатого пространства относительно исходного, а наоборот, т.е. искривление исходного пространства относительно сжатого, то выражение (7) примет вид

$$g_2^2 / k_1^2 + a_2^2 / k^2 = g_2^2 + a_2^2. \quad (8)$$

Подставив в (8) выражение для k (3), получим

$$g_2 \sqrt{1/k_1^2 - 1} = a_2 \frac{V}{c}. \quad (9)$$

При $k_1 = 1/\sqrt{2}$ выражение (9) приводится к виду

$$g_2 = a_2 \frac{V}{c}.$$

При $V=c$ искривляющая пространство волна преобразуется в гравитационную волну.

Таким образом, доказано, что в области сжатия сила тяжести в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем в исходном пространстве.

Скорость распространения искривляющей пространство волны определяется коэффициентом усиления K и имеет величину $V \leq 2,1 \cdot 10^8$ м/с.

Заключение

Выдвинута гипотеза о существовании искривляющих пространство волн, возникающих при переходе ядерного реактора из состояния вблизи мгновенной критичности в подкритическое состояние.

Эти волны являются по типу гибридными, промежуточными между электромагнитными и гравитационными.

Они порождены ядерными реакциями, протекающими в активной зоне реактора.

Дано описание волн, искривляющих пространство вблизи ядерного реактора и образующих монополю реактора. Доказано, что искривляющие пространство волны являются частным случаем гравитационных.

Результаты исследования могут быть использованы для развития квантовой теории гравитации и создания систем управления ядерным реактором в состоянии вблизи мгновенной критичности.

Список литературы

1. Качур С.А. Теория пространственно-временных монополей реакторов. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2019. – 364с.
2. Гравитационные волны: история изучения и открытие LIGO https://www.liveinternet.ru/users/flesh_atronach/post384335881/
3. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей/ С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №1. – С. 12-19.
4. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности.// Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т.1. – №1. – С. 18-26.
5. Качур С.А. Энтропийный анализ безопасности управления ядерным реактором посредством электромагнитного излучения/ С.А. Качур //

Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 4. – С.18-22.

6. Качур С.А. Частотный метод построения систем электромагнитного управления ядерным реактором вблизи мгновенной критичности/ С.А. Качур // Пром. теплотехника, 2013.– Т.35, Вып. 5. – С.27-32.
7. Качур С.А. Движение космического аппарата на основе модуляции кривизны пространства / С.А. Качур // Радиоэлектроника и информатика, 2013. – Вып. 2(21). – С.22-26.
8. Качур С.А. Модуляция кривизны пространства на основе системы ядерных реакторов/ С.А. Качур// Сб.науч.тр.СНУЯЭиП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. – Вып. 2(50). – С.13-26.
9. Качур С.А. Движение нерелятивистского объекта в искривленном пространстве ядерного реактора /С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №2. – С. 5-10.
10. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами/ И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; Под общ. ред. акад. Н.А. Доллежалея – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.

References

1. Kachur S.A. *Teoriya prostranstvenno-vremennykh monopolej reaktorov* [Theory of space-time monopoles of reactors]. Sevastopol, RIBEST, 2019,364p.
2. *Gravitacionnye volny: istoriya izucheniya i otkrytie LIGO* (Gravitational waves: the history of exploration and discovery LIGO) Available at: https://www.liveinternet.ru/users/flesh_atronach/post384335881/
3. Kachur S.A. Space curvature of nuclear reactor near-by prompt criticality by means of natural spatio-temporal monopole. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 1, pp. 12-19.
4. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
5. Kachur S.A. Entropic analysis of safety of management by a nuclear reactor by means of electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 4, pp. 18-22.
6. Kachur S.A. Frequency method of construction of the electromagnetic control systems by a nuclear reactor near-by instantaneous criticism. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 5, pp. 27-32.
7. Kachur S.A. Movement of space vehicle on the basis of modulation of space curvature. *Radioelektronika i informatika*, 2013, No. 2(21), pp. 22-26.
8. Kachur S.A. Modulation of space curvature on the basis of the nuclear reactors system. *Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sebastopol, SNUYaE i P, 2014, No. 2(50), pp. 13-26.

9. Kachur S.A. Movement of nonrelativistic object in the distorted space of nuclear reactor. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 2, pp. 5-10.
10. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical government bases by nuclear reactors]. Moskow, Energoizdat, 1981. 360p.

УДК 621.039

Воздействие температурных и радиационных полей на напряженно-деформированное состояние крышек ядерных реакторов типа ВВЭР

В.А.Пухлий¹, Е.С.Семенов²

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7 г.Севастополь, 299015, Россия, e-mail: pu1611@rambler.ru

²АНО ДПО «Техническая академия Росатом», 249031, еКалужская обл., г.Обнинск, ул.Курчатова, 21 e-mail: eugene_semenov@list.ru

Статья поступила 14.05.2019 г.; после доработки 28.05.2019 г.

Аннотация

Рассматриваются высокотемпературные и радиационные поля при их воздействии на напряженно-деформированное состояние крышек атомных реакторов типа ВВЭР. При расчетах крышки рассматриваются как биметаллические оболочки эллиптического очертания в плане. На основе вариационного принципа Лагранжа получены уравнения равновесия и естественные граничные условия. Интегрирование уравнений для осесимметричного случая, осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанным проф.В.А.Пухлий [9, 11].

Ключевые слова: температурные и радиационные поля, крышки ядерных реакторов, краевая задача, биметаллическая оболочка, модифицированные метод последовательных приближений

Influence of temperature and radiating fields on the is intense-deformed status of covers nuclear reactors type VVER

V.A.Pukhliy¹, E.S.Semenov²

¹Sevastopol state university, Kurchatova, 7 Sevastopol, 299015, Russia, e-mail: pu1611@rambler.ru

²ANO DPO «Technical academy Rosatom», 249031, Kaluga area, Obninsk, street Kurchatova, 21 e-mail: eugene_semenov@list.ru

Received 14.05.2019; received in final form 28.05.2019

Abstract

High-temperature and radiating fields are considered at their influence on the is intense-deformed status of covers of nuclear reactors of type VVER. At cover calculations are considered as bimetallic shells of an elliptic outline in the plan. On the basis of variation principle Lagrange the equations of balance and natural boundary conditions are received. Integration of the equations for осесимметричного a case, is carried out by the modified method consecutive approaches, the developed prof. V.A.Pukhliy [9, 11].

Keywords: temperature and radiating fields, covers of nuclear reactors, a regional problem, the bimetallic shells, modified method consecutive approaches.

Введение

Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических уста-

новок [1] содержат методы расчетов по выбору основных размеров; расчеты на статическую и динамическую прочность, устойчивость, циклическую прочность, длительную циклическую

прочность, прогрессирующее формоизменение, вибропрочность; методики определения механических свойств и испытаний для определения характеристик прочности.

Между тем в данных нормах отсутствуют методы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) части оборудования ядерных реакторов на основе теории оболочек. Так, например, крышки и днища ядерных реакторов, представляющие собой усеченные эллипсоиды рассчитываются приближенными методами, на основе теории толстостенных сосудов [2]. Внутренняя и торцевая поверхности крышки покрыты антикоррозионной наплавкой из нержавеющей аустенитной стали марки 08Х19Н10Г2Б. Материал крышки – нержавеющая аустенитная сталь марки 08ХНМФА.

С точки зрения механики крышку следует рассматривать как двухслойную оболочку круговой формы в плане эллиптического очертания, т.е. как круговой в плане усеченный эллипсоид вращения при совместном воздействии внутреннего давления, температуры и радиационного облучения. Построение общей теории упругих и упруго-пластических биметаллических изотропных и ортотропных пластик и оболочек было дано Э.И.Григолюком в цикле работ [5, 6].

В работе [7] на основе теоремы поверхностей [8] авторы получили основные соотношения для крышки ядерного реактора типа ВВЭР при расчетах на прочность как двухслойной (биметаллической) оболочки эллиптического очертания в плане.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является разработка теории расчета НДС крышек ядерных реакторов при воздействии температурного и радиационного полей и внутреннего давления. С этой целью используются уравнения биметаллических оболочек эллиптического очертания в плане. При решении осесимметричной задачи для крышки применяется модифицированный метод последовательных приближений [9-11].

Воздействие радиационного поля на оборудование реакторов АЭС

Радиационное облучение твердых тел сопровождается многочисленными эффектами, в результате которых возникает дополнительная объемная деформация Q_1 , изменяются упругие и пластические характеристики материала.

Оценим влияние нейтронного облучения НДС на состояние элементов конструкций. Рассмотрим однородное изотропное тело, занимающее полупространство $z \geq 0$. Если на границе тела ($z = 0$) параллельно оси z излучаются нейтроны с одинаковой средней энергией и интенсивностью φ_0 [нейтрон / (м²·сек)], то интенсивность потока нейтронов, доходящих до плоскости $z = \text{const}$ определяется следующим образом [3]:

$$\varphi(z) = \varphi_0 \cdot e^{-\mu z} \quad (1)$$

Величина μ называется *макроскопическим эффективным сечением*. Для любого химического элемента можно записать:

$$\mu = \sigma n_0 = \sigma \frac{A_0 \rho}{A}, \text{ см}^{-1}. \quad (2)$$

Здесь σ – эффективное сечение, отнесенное к одному ядру, n_0 – число ядер в 1 см³; A_0 – число Авогадро; A – атомный вес; ρ – плотность.

В стационарном случае, учитывая (1) к моменту времени t через сечение z пройдет интегральный поток:

$$I(z) = \varphi_0 t e^{-\mu z}. \quad (3)$$

Таким образом можно принять, что изменение объема вещества прямо пропорционально интегральному потоку $I(z)$:

$$Q_1 = B I(z) \quad (4)$$

где B – постоянный коэффициент, полученный из эксперимента.

Величина $I_0 = \varphi_0 t$ дает суммарный поток нейтронов на единицу площади поверхности тела. Следует заметить, что в ядерных реакторах φ_0 имеет порядок $10^{17} \div 10^{18}$ нейтрон/(м²·сек), а I_0 достигает значений $10^{23} \div 10^{27}$ нейтрон/м².

При этом объемная деформация Q_1 достигает значения 0,1. Следовательно, в зависимости от энергии нейтронов и облучаемого материала величина B может иметь порядок $10^{-28} \div 10^{-24}$ м²/нейтрон.

Следует подчеркнуть, что зависимость модуля упругости E , пределов текучести σ_T , прочности и всей диаграммы растяжения от интегрального потока I_0 различных энергий исследована экспериментально после облучения образцов в ядерных реакторах. Отмечено, что модуль упругости E при облучении возрастает до 5%. Пределы текучести и прочности материалов также возрастают при радиационном облучении.

Таким образом, по своему воздействию на упругие конструкции радиационное облучение противоположно тепловому воздействию, которое уменьшает предел текучести материала и другие характеристики.

Для аналитического описания радиационного упрочнения предела текучести материала используется следующая формула:

$$\sigma_T = \sigma_T^0 \left\{ 1 + A[1 - \exp(-\xi I)]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (5)$$

Здесь σ_T , σ_T^0 – предел текучести облученного и необлученного материалов; A , ξ – константы материала, определяемые из экспериментов.

Что касается вопросов влияния радиационного облучения на ползучесть материалов, что первые сведения были получены при испытании урана в ядерном реакторе.

Увеличивающееся при облучении количество точечных дефектов способствует ускорению ползучести урана в 50–100 раз, несмотря на то, что радиационное упрочнение материала приводит к уменьшению скорости движения дислокаций.

На рис.1 приведены кривые ползучести циркониевого сплава-Циркалой-2 [4].

Напряжение во время испытаний составляло 140 МПа, температура $T = 573$ К.

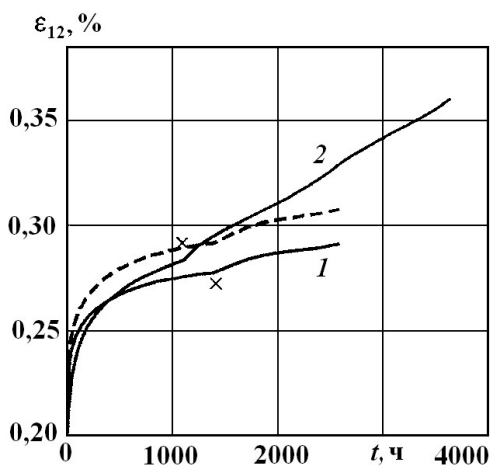


Рис.1. Ползучесть циркониевого сплава-Циркалой-2: 1 – процесс без облучения; 2 – при облучении в реакторе с интенсивностью $\phi_0 = 5 \cdot 10^{16}$ нейтрон/(м²·сек); штриховая линия соответствует расчету.

Следует отметить, что наряду с процессом ускоренной ползучести при воздействии радиационного облучения наблюдается также ускоренная релаксация напряжений.

Таким образом, при решении краевой задачи по расчету термоупругих элементов ядерных реакторов будут использоваться известные зави-

симости модуля упругости E от температуры, в которых должно быть учтено радиационное упрочнение физико-механических характеристик материала.

Отметим, что в условиях радиационного облучения материала повышается коррозионная и эрозионная стойкость материала конструктивных элементов ядерных реакторов вследствие радиационного упрочнения предела текучести материала – σ_T .

Формулировка задач термоупругости

В общем случае постановка задачи термоупругости заключается в следующем.

Необходимо при заданных механических и тепловых воздействиях определить 16 функций координат x_k и времени t : шесть компонентом тензора напряжения σ_{ij} , шесть компонентом тензора деформации ε_{ij} , три компонента вектора перемещения u_i и температуру T , удовлетворяющих:

– 3-м уравнениям движения

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho \ddot{u}_i, \quad (6)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений; F_i – объемные силы; $\rho \ddot{u}_i$ – силы инерции; ρ – плотность; u_i – вектор перемещений.

Здесь нижний индекс следующий после запятой означает частное дифференцирование по соответствующей координате.

Частные производные по времени обозначаются точками сверху.

– 6-ти соотношениям между напряжениями и деформациями

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} + [\lambda \varepsilon_{kk} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0)] \delta_{ij}, \quad (7)$$

$$\text{где } \varepsilon_{kk} = \frac{\sigma_{kk}}{3K} + 3\alpha_T (T - T_0);$$

$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$, где λ и μ – коэффициенты Ляме при изотермической деформации; K – изотермический модуль объемного расширения; T_0 – температура тела в недеформированном состоянии ($T_0 = \text{const}$); $(T - T_0)$ – приращение температуры.

$$\delta_{ij} - \text{символ Кронекера } \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq j \\ 1 & \text{при } i = j \end{cases}$$

Из (7) следуют соотношения между деформациями и напряжениями следующего вида:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{(1 + \nu) \sigma_{ij}}{E} - \nu \frac{\sigma_{kk}}{E} \delta_{ij} + \alpha_T (T - T_0) \delta_{ij}; \quad (8)$$

– 6-ти соотношениям между деформациями и перемещениями:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (9)$$

– уравнение теплопроводности

$$(\lambda_{ij} T_{,i})_{,j} + W_0 = T \dot{S}, \quad (10)$$

где S – объемная плотность энтропии; W_0 – удельная мощность (количество тепла, производимого за единицу времени в единице объема) источников тепла.

$$S = -\frac{1}{2} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \varepsilon_{KK}^2 - \frac{\partial \mu}{\partial T} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} + \\ + \frac{\partial}{\partial T} [(3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0)] \varepsilon_{KK} + \int_{T_0}^T \frac{C_{\varepsilon=0}}{T} dT. \quad (11)$$

К этим уравнениям (6)-(10) присоединяются начальные и граничные условия.

Следует отметить, что при исследовании термодинамики деформирования кроме плотности внутренней энергии U и плотности энтропии S вводятся следующие термодинамические функции:

– плотность свободной энергии:

$$F = U - TS; \quad (12)$$

– плотность термодинамического потенциала Гиббса [19]:

$$G = F - \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}. \quad (13)$$

Подчеркнем, что величины U , F , G – функции состояния. Приращения их при изменении состояния упругого тела представляют собой полные дифференциалы.

Данные функции называются термодинамическими потенциалами.

Исходя из выражения

$$dU = TdS + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad (14)$$

с помощью уравнений (12) и (13) находим:

$$dF = -SdT + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}; \quad (15)$$

$$dG = -SdT - \varepsilon_{ij} d\sigma_{ij}. \quad (16)$$

Так как dU , dF и dG – полные дифференциалы, то

$$\frac{\partial U}{\partial S} = T, \quad \frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial F}{\partial T} = -S, \quad \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial G}{\partial T} = -S, \quad \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} = -\varepsilon_{ij}. \quad (19)$$

Напомним физический смысл введенных термодинамических потенциалов. Как видно из уравнений (14) и (15), при изотермическом процессе ($dT = 0$) элементарная работа деформации

$\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$ совершается за счет возрастания свободной энергии подобно тому, как при адиабатическом процессе ($dS = 0$) эта работа происходит за счет возрастания внутренней энергии.

Из уравнения (16) следует, что возрастание дополнительной работы деформации $\varepsilon_{ij} d\sigma_{ij}$ при $dT = 0$ соответствует убыли термодинамического потенциала Гиббса [19].

Каждый термодинамический потенциал является функцией 7 из 14 термодинамических параметров σ_{ij} , ε_{ij} , T , S ($i, j = 1, 2, 3$): $U = U(\varepsilon_{ij}, S)$, $F = F(\varepsilon_{ij}, T)$, $G = G(\sigma_{ij}, T)$. Остальные параметры находятся с помощью частных производных (17)-(19).

Если известен хотя бы один термодинамический потенциал, можно определить остальные.

Для установления соотношений между напряжениями и деформациями необходимо составить выражение для плотности свободной энергии F как функции компонентов тензора деформации ε_{ij} и температуры T .

Начальные условия обычно задаются в виде распределений компонентов вектора перемещения u_i и температуры T во всей области V упругого тела:

$$u_i = g_i(x_k), \quad u_i = h_i(x_k), \quad T = f(x_k) \quad (20)$$

при $t = 0$.

Здесь и дальше обозначения $g_i(x_k)$, $h_i(x_k)$, $f(x_k)$ означают функции всех координат x_k ($k = 1, 2, 3$) в рассматриваемой области.

Граничные условия на поверхности Ω упругого тела, ограничивающей его объем V , складываются из механических и тепловых условий.

Механические граничные условия задаются либо в перемещениях

$$u_i = g_i(x_k, t) \text{ при } t > 0, \quad (21)$$

либо в напряжениях

$$\sigma_{ij} n_j = f_i(x_k, t) \text{ при } t > 0, \quad (22)$$

где f_i – компоненты вектора поверхности силы; n_i – компоненты единичного вектора внешней нормали к поверхности Ω .

В качестве теплового граничного условия применяется одно из граничных условий теории теплопроводности.

Механические и тепловые граничные условия могут быть также смешанными.

На одной части поверхности механические граничные условия могут быть заданы в перемещениях (21), а на другой – в напряжениях (22).

Тепловое граничное условие на одной части поверхности тела задается, например, температурой:

$$T(x_K, t) = f(x_K, t), \quad (23)$$

где x_K – точка поверхности тела; $f(x_K, t)$ – заданная функция.

На другой частоте поверхности тела граничные условия могут быть заданы законом конвективного теплообмена с окружающей средой:

$$-\lambda_q \frac{\partial T(x_K, t)}{\partial n} = \alpha [T(x_K, t) - v], \quad (24)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, который зависит от термических и физических характеристик поверхности тела и окружающей среды.

Система уравнений (6), (7) или (8)–(10) при указанных начальных граничных условиях описывает связанную нелинейную задачу термоупругости.

При $\frac{T - T_0}{T_0} \ll 1$ значения упругих и термических коэффициентов и удельных теплоемкостей предполагаются постоянными, вместо уравнения (10) применяется уравнение теплопроводности:

$$\lambda_q T_{,ii} + w_0 = c_\epsilon \dot{T} + (3\lambda + 2\mu) \alpha_T T_0 \dot{\epsilon}_{KK}. \quad (25)$$

Здесь линеаризуем второй член в правой части уравнения (25), полагая $T \approx T_0$.

Таким образом мы рассматриваем случай малого термического возмущения, когда $\frac{T - T_0}{T_0} \ll 1$. При этом упругие коэффициенты λ , μ , термические коэффициенты α_T , λ_q и удельные теплоемкости $c_{\sigma=0}$ и $c_{\epsilon=0}$ можно считать не зависящими от температуры. Вместо этих теплоемкостей можно рассматривать удельную теплоемкость соответственно при постоянном тензоре напряжения c_σ и при постоянном тензоре деформации c_ϵ .

В результате связанная задача термоупругости становится линейной.

В работе [20] доказывается, что для области V , свободной от объемных сил и источников тепла, решение системы уравнений (6)–(9) при начальных и граничных условиях, заданных через перемещения и температуру, является единственным. Это доказательство можно обобщить и на другие механические и тепловые воздействия и граничные условия.

Составим для этой задачи уравнения движения в перемещениях. Выражая в уравнениях (6)

напряжения через деформации по формуле (7) и учитывая, что члены, содержащие ϵ_{kk} и T , сохраняются только при $i = j$, получаем:

$$2\mu \epsilon_{ij,j} + \lambda \epsilon_{kk,i} + F_i - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0)_{,i} - \rho \ddot{u}_i = 0 \quad (26)$$

В этом уравнении деформации заменяем перемещениями по формуле (19). Заменяя j неммым индексом k и учитывая, что $u_{k,ik} = u_{k,ki}$, находим:

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{k,ki} + F_i - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0)_{,i} - \rho \ddot{u}_i = 0. \quad (27)$$

Три уравнения (9) совместно с четвертым уравнением (25) при определенных начальных и граничных условиях описывают изменение в пространстве и во времени поля деформации и температурного поля. Представим эти уравнения в векторной форме:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} + \vec{F} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad } (T - T_0) - \rho \ddot{\vec{u}} = 0. \quad (28)$$

$$\nabla^2 T + \frac{w_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} T - \frac{(3\lambda + 2\mu) \alpha_T T_0}{\lambda_q} \text{div } \vec{u} = 0. \quad (29)$$

где $a = \frac{\lambda_q}{c_\epsilon}$ – коэффициент температуропроводности.

Классификация задач термоупругости

А. Термоупругая деформация тела, возникающая от нестационарных механических и тепловых воздействий, сопровождается обратным эффектом – изменением его температурного поля.

Задача термоупругости, в которой учитывается указанный эффект, называется связанной динамической задачей термоупругости, или связанной задачей термоупругости.

Постановка связанной задачи термоупругости рассмотрена ранее. Система уравнений, описывающая эту задачу, содержит уравнение теплопроводности (10), которое в общем случае является нелинейным.

При $\frac{T - T_0}{T_0} \ll 1$ уравнение теплопроводности линеаризуется и линейная связанная задача термоупругости сводится к решению системы уравнений (28) и (29).

Деформация упругого тела от механических и тепловых воздействий вызывает малое изменение его температуры $T - T_0$, а поэтому учет эффекта связанности при обычных условиях

теплообмена имеет значение не столько для задач о тепловых напряжениях, сколько для задач о термоупругом рассеянии энергии.

В задачах, в которых термическое возмущение упругого тела вызывается одной только деформацией от нестационарных механических воздействий, процесс деформирования обычно предполагается адиабатическим. При такой деформации приращение температуры $T - T_0$ определяется следующим выражением:

$$T - T_0 = - \frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_T T_0}{c_\varepsilon} \operatorname{div} \vec{u}. \quad (30)$$

Подставляя это выражение в уравнение (28), получаем уравнение динамической задачи теории упругости в перемещениях:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda_s + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} + \vec{F} - \rho \ddot{\vec{u}} = 0, \quad (31)$$

где λ_s – адиабатический коэффициент Ляме, определяемый следующим выражением:

$$\lambda_s = \lambda + \frac{(3\lambda + 2\mu)^2 \alpha_T^2 T_0}{c_\varepsilon}. \quad (32)$$

Отметим, что второй коэффициент Ляме μ при адиабатической деформации не изменяется.

Если механические воздействия отсутствуют, а тепловые воздействия медленно изменяются во времени, то в уравнении (5.22) можно пренебречь инерционным членом $-\rho \ddot{\vec{u}}$.

Применяя при $\vec{F} = 0$ и $-\rho \ddot{\vec{u}} = 0$ оператор div к обеим частям этого уравнения и учитывая, что $\operatorname{div} \operatorname{grad} = \nabla^2$, после интегрирования получаем:

$$\operatorname{div} \vec{u} = \frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_T}{\lambda + 2\mu} (T - T_0) + \varphi(x_k), \quad (33)$$

где $\varphi(x_k)$ – гармоническая функция координат x_k ; ∇^2 – оператор Лапласа.

Подставляя выражение (33) в уравнение (29), находим уравнение теплопроводности в виде:

$$\nabla^2 T + \frac{w_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} (1 + \varepsilon) T = 0, \quad (34)$$

где

$$\varepsilon = \frac{(3\lambda + 2\mu)^2 \alpha_T^2 T_0}{(\lambda + 2\mu)c_\varepsilon}. \quad (35)$$

Б. Задача термоупругости, описываемая уравнением (31) без инерционного члена $-\rho \ddot{\vec{u}}$ и уравнением (34), называется связанной квазистатической задачей термоупругости.

В случае адиабатического процесса деформирования определяем решение уравнения (31)

для вектора перемещения $\vec{u}$ независимо от уравнения теплопроводности, а в случае медленного изменения тепловых воздействий находим решение уравнения теплопроводности (34) независимо от уравнения для вектора перемещения.

При резко нестационарных тепловых воздействиях в уравнении (28) при $\vec{F} = 0$ сохраняется член $-\rho \ddot{\vec{u}}$, но при $\varepsilon \ll 1$ в уравнении (29) не учитывается член механической связи $-\frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_T T_0}{\lambda_q} \operatorname{div} \vec{u}$.

В. Задача термоупругости, описываемая двумя уравнениями:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0) - \rho \ddot{\vec{u}} = 0, \quad (36)$$

$$\nabla^2 T + \frac{w_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} T = 0, \quad (37)$$

называется несвязанной динамической задачей термоупругости, или просто динамической задачей термоупругости.

При существенном приращении температуры $T - T_0$ коэффициенты λ , μ , α_T в соотношениях (7) являются функциями T , а следовательно, и функциями координат x_k и времени t . Учитывая это и выполняя преобразования, аналогичные проведенным в предыдущем разделе, находим для такой задачи следующие уравнения движения в перемещениях:

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{k,ki} + \mu_{,k} (u_{i,k} + u_{k,i}) + \lambda_{,i} u_{k,k} - [(3\lambda + 2\mu)\alpha_T (T - T_0)]_{,i} - \rho \ddot{u}_i = 0. \quad (38)$$

Вместо этих трех скалярных уравнений можно записать одно векторное в виде:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} + 2 \operatorname{grad} \mu \cdot \Pi_\varepsilon + \operatorname{grad} \lambda \operatorname{div} \vec{u} - \operatorname{grad} [(3\lambda + 2\mu)\alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0)] - \rho \ddot{\vec{u}} = 0, \quad (39)$$

где $\operatorname{grad} \mu \cdot \Pi_\varepsilon$ – скалярное произведение тензора деформации Π_ε на вектор $\operatorname{grad} \mu$ [21].

Если учесть зависимость λ_q от температуры, то уравнение теплопроводности становится нелинейным.

Г. Задача термоупругости, в которой не учитываются член $\frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_T T_0}{\lambda_q} \operatorname{div} \vec{u}$ в уравнении (29) и член $-\rho \ddot{\vec{u}}$ в уравнении (28), называется несвязанной квазистатической зада-

чей термоупругости, или квазистатической задачей термоупругости, или квазистатической задачей термоупругости.

При стационарном температурном поле задача термоупругости является статической.

Крышка ядерного реактора ВВЭР-1000

Крышка ядерного реактора, например, типа ВВЭР [12, 13] является одним из основных узлов верхнего блока (рис. 2) и предназначена для:

- создания геометрического объема реактора;
- уплотнения главного разъема реактора;
- размещения приводов системы управления и защиты реактора и электрооборудования приводов;
- размещения выводов коммуникаций системы и их уплотнения;
- удержания от всплытия блока защитных труб, тепловыделяющих сборок и шахты реактора.

Крышка реактора (рис.2, б) имеет тарельчатую форму и представляет собой штампосварную конструкцию, состоящую из усеченного эллипсоида и фланца. Эллипсоид и фланец соединены между собой сварным швом, выполненным автоматическим способом. Высота от

опорной поверхности крышки до торца патрубков ВБ-265 см.

Внутренняя и торцевая поверхности крышки покрыты антикоррозионной наплавкой из нержавеющей аустенитной стали марки 08Х19Н10Г2Б. Материал крышки – нержавеющая аустенитная сталь марки 08ХНМФА.

На эллипсоиде крышки толщиной $H = 29$ см и диаметром $\varnothing 458$ см (рис. 2,а) установлено оборудование верхнего блока реактора (ВБ).

Крышка ВБ установлена на опорный фланец верхней обечайки блока защитных труб (БЗТ) и притягивается к корпусу реактора 54 шпильками М170×6 (рис. 3).

Шпильки обеспечивают во всех эксплуатационных режимах прочное прижатие крышки ВБ к корпусу и уплотнение гайковертом (ГРР) путем деформирования двух прутковых никелевых прокладок.

Шпильки и гайки реактора работают в крайне тяжелых условиях по температуре и давлению. Чтобы обеспечить их надежную затяжку при моменте, обеспечивающем нулевые протечки через фланец крышки реактора, при воздействующих на нее температуре и давлении, используется специальное приспособление - гайковерт главного разъема реактора.

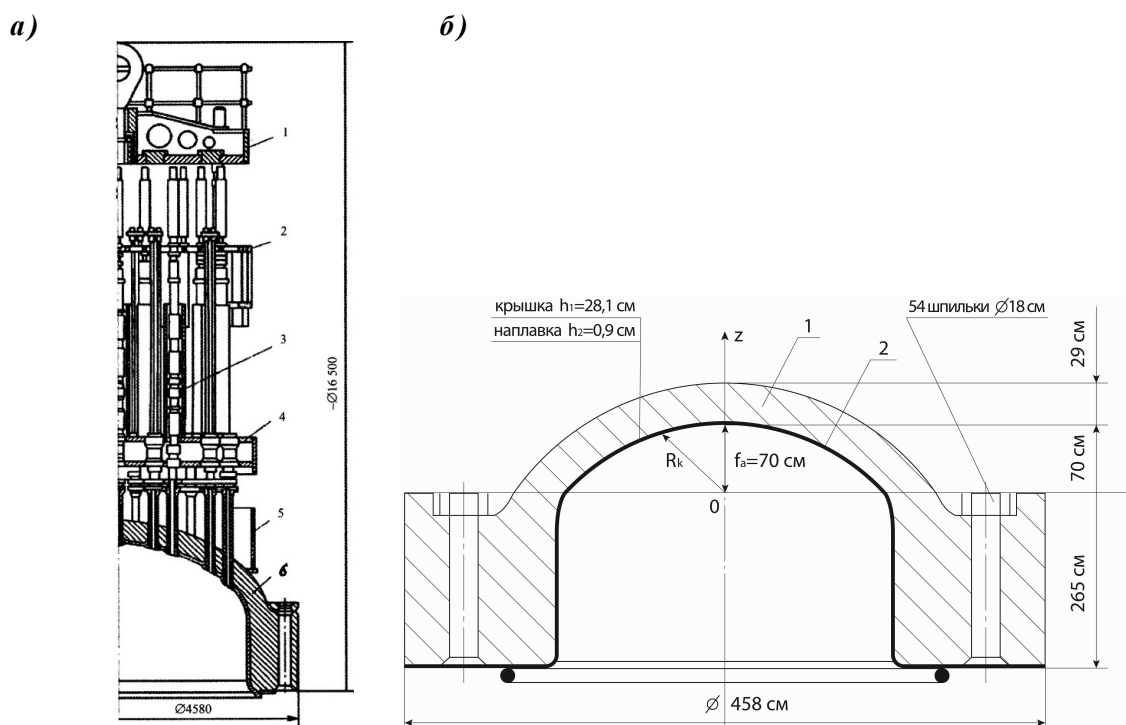


Рис2. К расчету крышки ядерного реактора: а) верхний блок: 1 – траверса; 2 – дистанционирующая решетка; 3 – привод шагового электромеханизма; 4 – каркас; 5 – обечайка; 6 – крышка; б) крышка реактора: 1 – материал основного металла $h_1 = 28,1$ см; 2 – антикоррозионная наплавка $h_2 = 0,9$ см.

Гайковерт предназначен для силовой вытяжки шпилек ГРР в пределах упругих деформаций с последующим свободным доворачиванием (отворачиванием) гаек и фиксированием резьбовых соединений с целью уплотнения главного разъема реактора.

Плотность главного разъема обеспечивается путем обжатия двух никелевых прутковых прокладок диаметром 5 мм, которые устанавливаются в месте контакта фланцев крышки и корпуса в V-образные кольцевые канавки на фланце корпуса.

При уплотнении ГРР используется метод предварительного растяжения шпилек.

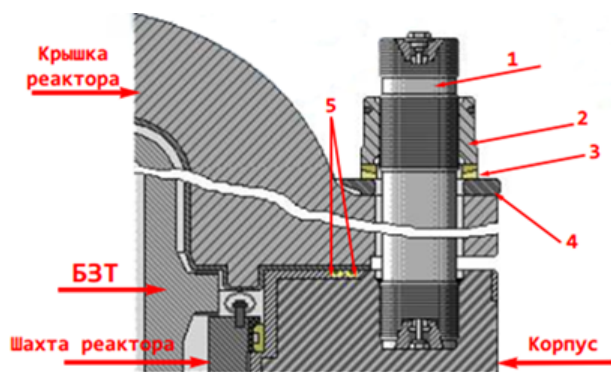


Рис.3. Шпилька главного разъема [1]: 1 – шпилька; 2 – гайка; 3 – комплект шайб (вогнутая и выпуклая); 4 – кольцо промежуточное; 5 – никелевые прокладки.

Все вышеизложенное позволяет при дальнейшем теоретическом исследовании НДС принимать для крышки-эллипсоида условия жесткой заделки по контуру.

Внутренняя и внешняя геометрия крышки реактора

Из проведенного выше анализа конструкции крышки ядерного реактора следует, что с точки зрения механики оболочек крышку допустимо рассматривать как двухслойную оболочку круговой формы в плане эллиптического очертания, то есть как круговой в плане усеченный эллипсоид вращения.

По классификации В.З.Власова [14] крышка представляет собой тонкую оболочку (отношение толщины крышки $h = 29$ см к ее характерному размеру – диаметру равно $29/458 = 1/15$), а отношение стрелы прогиба оболочки f_0 к ее диаметру равно $70/458 = 1/7$).

Так как производные $\partial z / \partial x$, $\partial z / \partial y$ не малы по сравнению с единицей, то дифференци-

альное условие пологости оболочки не выполняется.

Поэтому конструкция крышки может моделироваться тонкой непологой двухслойной оболочкой вращения.

Рассмотрим нагрузку, действующую на крышку. Прежде всего, крышка находится под воздействием собственной массы $G = 90\,000$ кг, равномерно распределенной по всей поверхности крышки, направленной противоположно координате z : $q_1 = 0,015$ МПа. Кроме того, на крышку установлено оборудование верхнего блока (рис.1,а). Масса верхнего блока $G = 155\,000$ кг с учетом массы самой крышки, массы оборудования верхнего блока, действующего на крышку, составляет $155\,000 - 90\,000 = 65\,000$ кг, таким образом, дополнительная равномерно распределенная нагрузка q_2 составляет порядка $q_2 = 0,01$ МПа.

Со стороны ядерного реактора на крышку вдоль координаты z действуют 2 фактора: давление $P_1 = 16$ МПа и температура $T_1 = 280$ °С.

Как видно из вышеприведенного анализа, основным видом нагрузки на крышку ядерного реактора являются внутреннее давление, температура и радиационное облучение.

Таким образом, расчет крышки реактора сводится к расчету напряженно – деформированного состояния защемленной по контуру тонкой непологой двухслойной оболочки в виде усеченного кругового эллипсоида вращения при совместном действии внутреннего давления, температуры и радиационного облучения. Отдельной самостоятельной задачей, которая в данной статье не рассматривается, является расчет на прочность шпилек (рис.3). Эта задача может быть решена на основе обычного инженерного расчета.

В дальнейшем нам понадобятся внутренние и внешние параметры двухслойной оболочки [7].

В работе [7] на основе теории поверхностей (дифференциальная геометрия [8]) получены параметры для крышки ядерного реактора.

Рассматривая 1-ю квадратичную форму для поверхности усеченного эллипсоида получим выражения для главных радиусов привязки

$$R_1 = \frac{a^2 b^2}{(a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha)^{3/2}};$$

$$R_2 = \frac{a^2}{(a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha)^{1/2}}.$$

Из рассмотренной 2-й квадратичной формы [8] получим параметры Ламе, характеризующие внешнюю геометрию эллипсоида (искривленность в пространстве):

$$b_{11} = \frac{a}{\sqrt{1-e^2}} (1 - e^2 \cos^2 \alpha)^{3/2}; \quad b_{12} = 0;$$

$$b_{22} = \frac{a \cdot \sin^2 \alpha}{\sqrt{1-e^2}} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}.$$

Здесь a – большая полуось эллипсоида,

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} - \text{эксцентриситет эллипсоида.}$$

Разрешающие уравнения для биметаллической эллипсоидальной оболочки

Построение математических моделей неоднородных слоистых оболочек и пластин относится к одному из самых сложных разделов механики деформируемого твердого тела и, вместе с тем, одному из наиболее важных для практических приложений, в том числе, в ядерной энергетике, ракетной и авиационной технике. Простейшим классом слоистых неоднородных конструкций являются двухслойные, в частности, биметаллические полосы, пластины и оболочки.

Уравнение равновесия биметаллической оболочки получим на основе вариационного принципа Лагранжа:

$$\delta \Pi = \delta \Pi_1 + \delta \Pi_2 = 0. \quad (40)$$

Здесь $\delta \Pi_1$ – вариация потенциальной энергии деформации оболочки; $\delta \Pi_2$ – вариация потенциала внешних сил, равная вариациям работы внешних сил, взятой с обратным знаком.

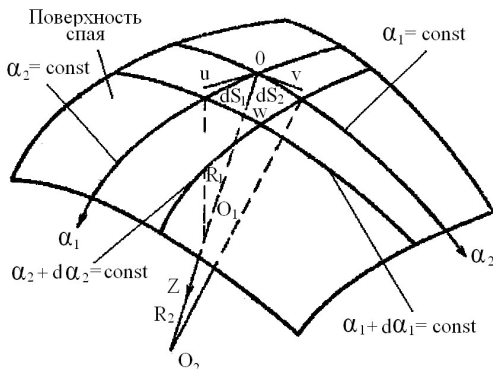


Рис.4. Система криволинейных координат на недеформированной поверхности спая.

Для осесимметричной деформации эллипсоидальной двухслойной оболочки систему уравнений в усилиях и моментах получим следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\alpha} (N_1 R_2 \sin \alpha) - N_2 R_1 \cos \alpha - \\ - Q_1 R_2 \sin \alpha = 0, \\ \frac{d}{d\alpha} (Q_1 R_2 \sin \alpha) + N_1 R_2 \sin \alpha + N_2 R_1 \sin \alpha + \\ + q R_1 R_2 \sin \alpha = 0, \\ \frac{d}{d\alpha} (M_1 R_2 \sin \alpha) - M_2 R_1 \cos \alpha - \\ - Q_1 R_1 R_2 \sin \alpha = 0. \end{cases} \quad (41)$$

Здесь α – угол между нормалью к поверхности спая и осью симметрии крышки; принято также, что $p_1 = p_2 = 0$.

Далее первые два уравнения (40) тождественно удовлетворяются введением силовой функции

$$V = Q_1 R_2, \quad (42)$$

через которую усилия выражаются по формулам

$$N_1 = -\frac{V}{R_2} \operatorname{ctg} \alpha + \frac{F(\alpha)}{R_2 \sin^2 \alpha}, \quad (43)$$

$$N_2 = -\frac{1}{R_2} \frac{dV}{d\alpha} - \frac{1}{R_1} \left(\frac{F(\alpha)}{\sin^2 \alpha} + R_1 R_2 p_z \right),$$

где

$$F(\alpha) = R_2 \sin \alpha (N_1 \sin \alpha + Q_1 \cos \alpha).$$

Для кругового в плане эллипсоида вращения следует принять $R_1 = R_2 = R$.

Тогда разрешающие уравнения задачи существенно упрощаются и приводятся к виду

$$\begin{cases} L(\vartheta) - \psi_3 \vartheta + \psi_2 L(V) - \left(\psi_1 - \frac{R_1}{D_1^*} \right) V = F_1(\alpha), \\ L(V) - \frac{B_1^2 - B_2^2}{B_1} [\lambda_2 L_2(\vartheta) - (\lambda_1 - R_1) \vartheta] + \\ + \frac{B_2}{B_1} V = F_2(\alpha). \end{cases} \quad (44)$$

При этом

$$L(\vartheta) = \frac{d^2(\vartheta)}{d\alpha^2} + \operatorname{ctg} \alpha \frac{d(\vartheta)}{d\alpha} - \operatorname{ctg}^2 \alpha \cdot (\vartheta)$$

$$F_1(\alpha) = -\frac{d}{d\alpha} (l^* R + \psi_2 q R^2),$$

$$F_2(\alpha) = \frac{d}{d\alpha} \left[\frac{B_1 - B_2}{B_1} (fR) - (qR^2) \right].$$

Здесь для общности считается, что имеет место произвольный нагрев по толщине и вдоль меридиана.

Граничные условия для биметаллических оболочек совпадают с аналогичными условиями для однородных оболочек. Так, для жестко заделанного края получим:

$$w = \frac{\partial w}{\partial n} = 0. \quad (45)$$

Аналитическое решение краевой задачи для усеченного эллипсоида

Итак, задача расчета крышки реактора при осесимметричном нагружении сведена к краевой задаче для системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка с переменными коэффициентами.

Переменность коэффициентов полученной системы уравнений не позволяет получить аналитическое решение задачи.

В математике известны лишь немногие частные случаи, когда удастся получить точное решение уравнений с переменными коэффициентами.

Эффективный вариант решения системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами в степенных полиномах был представлен ранее в работах [9, 10].

Проведенные исследования решений различных краевых задач математической физики в степенных рядах показали, что в ряде случаев имеет место медленная сходимость степенных рядов в модифицированном методе последовательных приближений.

Известно, что одна и та же функция может быть представлена целым спектром различных степенных рядов. Представляя по существу одну и ту же функцию, все они обладают весьма различной скоростью сходимости. Если целью является достижение абсолютной точности, то все эти представления равнозначны. Но если целью является построение решения с заданной ограниченной точностью, то эти представления будут совершенно различны.

Самой слабой сходимостью обладают ряды Тейлора, с другой стороны, самая сильная сходимость характерна для полиномов Чебышева [15, 16].

Здесь для ускорения сходимости решения используется метод телескопического сдвига степенного ряда Ланцоша [16].

Идея метода заключается в том, что имеющийся в нашем распоряжении ряд Мак-Лорена телескопически сдвигается в гораздо более ко-

роткий ряд, не теряя в точности. Для этого используется возможность представления любого степенного ряда через смещенные полиномы Чебышева на интервале [0,1].

Такой подход апробирован на решении ряда прикладных задач и изложен в работах профессора В.А.Пухлия [11, 17, 18].

Модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева

Предварительно представим систему уравнений осесимметричной задачи (44) в виде системы уравнений 1-го порядка в нормальной форме Коши:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^s B_{v,m} X_v + f_m \quad m = 1, 2, \dots, s. \quad (46)$$

В соответствии с методом переменные коэффициенты $B_{v,m}$ и свободные члены f_m представим через смещенные полиномы Чебышева:

$$f_m = \sum_{r=0}^q f_{m,r} (d_r \cdot r!)^{-1} \sum_{k=0}^r a_k T_k^*(\xi),$$

$$B_{v,m} = \sum_{r=0}^q b_{v,m,r} d_r^{-1} \sum_{k=0}^r a_k T_k^*(\xi). \quad (47)$$

Здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения ξ^r в ряд по многочленам Чебышева $T_k^*(\xi)$. В выражениях (40) $d_r = 1$ для $r = 0$ и $d_r = 2^{2r-1}$ для остальных r .

Общее решение системы уравнений (44) имеет вид [11, 17, 18]:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^s C_{\mu} \left[d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi) \delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] +$$

$$+ \sum_{j=0}^q t_{m,j,0} [d_{j+1} (j+1)!]^{-1} \sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\xi) +$$

$$+ \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}, \quad (48)$$

где $t_{m,j,0} = f_{m,r}$ при $j = r$; μ – номер фундаментальной функции; C_{μ} – постоянные интегрирования. В решении (48) $\delta = 1$, если $m = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ .

Первое приближение $X_{m,\mu,1}$ получается из подстановки нулевого приближения: $d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi) \delta$ в

$$\text{правую часть системы } \frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^s B_{v,m} X_v.$$

Последующие приближения осуществляются по формулам:

$$\begin{aligned}
X_{m,\mu,n} &= \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,\mu,n,j} [d_{n+j-1}(n+j-1)!]^{-1} \times \\
&\times \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\xi); \\
X_{m,n} &= \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,n,j} [d_{n+j-1}(n+j-1)!]^{-1} \times \\
&\times \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\xi), \quad (49)
\end{aligned}$$

где $\beta = n(q+3) - 2$.

Системы фундаментальных функций (49) являются равномерно сходящимися рядами, при этом коэффициенты $t_{m,\mu,n,j}$ и $t_{m,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned}
t_{m,\mu,n,j} &= \sum_{v=1}^s \sum_{r=0}^q b_{v,m,r} t_{v,\mu,n-1,j-r} (n+j-1)^{-1} \times \\
&\times \prod_{\gamma=0}^r (n+j-1-\gamma), \\
t_{m,n,j} &= \sum_{v=1}^s \sum_{r=0}^q b_{v,m,r} t_{v,n-1,j-r} (n+j)^{-1} \times \\
&\times \prod_{\gamma=0}^r (n+j-\gamma).
\end{aligned}$$

Постоянные C_{μ} , входящие в общее решение (48), находятся из граничных условий (45).

Выводы

Предложены математическая модель и алгоритм расчета модифицированным методом последовательных приближений двухслойной тонкой непологой оболочки вращения эллиптического очертания при термосиловом нагружении, моделирующей крышку ядерного реактора.

Список литературы

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. Гетман А.Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 420 с.
3. Ильюшин А.А., Огибалов П.М. Упругопластические деформации полых цилиндров. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 224 с.
4. Платонов П.А. Действие облучения на структуру и свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 402 с.
5. Григолюк Э.И. Тонкие биметаллические оболочки и пластины. – Инженерный сборник, 1953, том 17, с.69-120.
6. Григолюк Э.И. Уравнения осесимметричных биметаллических упругих оболочек. – Инженерный сборник, 1954, том 18, с.89-98.
7. Пухлий В.А., Коган Е.А., Пухлий К.В. Основные соотношения дифференциальной геометрии для крышки ядерного реактора при расчетах на прочность. – Энергетические установки и технологии. – Севастополь: СевГУ, 2018, том 4, №3, с.
8. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. – М.: Гостехиздат, 1950. – 360 с.
9. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. вычислит. матем. и матем. физики, 1978, 18, №5, с.1275-1282.
10. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. – Дифференциальные уравнения, 1979, 15, №11, с.2039-2043.
11. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений. – Обзорение прикладной и промышленной математики, 2017, том 24, вып.1, с.37-48.
12. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонан В.И. Конструирование ядерных реакторов: Учебное пособие для вузов. Под общей ред. акад. Н.А.Доллежала. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
13. Лескин С.Т., Шелегова А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000. Учебное пособие. – М.: Изд-во НИЯУ «МИФИ», 2011. – 116 с.
14. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.: Гостехиздат 1949. – 784 с.
15. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximation. – New York-London. Academic Proc. Inc., 1975. – 608 p.
16. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
17. Пухлий В.А. Аналитический метод решения краевых задач теории оболочек. – Труды XIII Всес. конф. по теории пластин и оболочек. Часть IV. – Таллин: Изд-во ТПИ, 1983. с.101-107.
18. Пухлий В.А. Решение задачи об изгибе косоугольной в плане цилиндрической трехслойной панели модифицированным методом последовательных приближений. – Прикладная механика, 1986, том 22, №10, с.62-67.
19. Gibbs J.W. On the equilibrium of heterogeneous substances. – Trans. of the connectial Academy. – New-York, 1876. – 300 p.
20. Weiner J.H. A uniqueness for the coupled thermoelastic problem. – Quart. of Appl. Math., 1957, vol.15, №1.

21. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.

Reference

1. Norms of calculation on durability of the equipment and pipelines of nuclear power installations (PNAE Г-7-002-86). Gosatomenergondzor the USSR. - M: Energatomizdat, 1989. - 525 p.
2. Hetman A.F. Resource of operation of vessels and atomic power station pipelines. - M: Energatomizdat, 2000. - 420 p.
3. Iljushin A.A., Ogibalov P .M. Uprugoplasticheskie of deformation of hollow cylinders. - M: Moscow State University Publishing house, 1960. - 224 p.
4. Platonov P. A. Irradiation action on structure and properties of metals. - M: Mechanical engineering, 1971. - 402 p.
5. Grigoljuk E.I. Thin bimetallic shells and plates. - the engineering collection, 1953, vol. 17, p.69-120.
6. Grigoljuk E.I. Equation simmetric bimetallic elastic shells. - The engineering collection, 1954, vol. 18, p.89-98.
7. Pukhliy V. A, Kogan E.A., Pukhliy K.V. Core of a parity of differential geometry for a nuclear reactor cover at calculations on durability. - Power installations and technologies. - Sevastopol: SevSU, 2018, vol. 4, №3, p.16-23.
8. Rashevsky P.K. Kurs of differential geometry. - M: Gostechizdat, 1950. - 360 p.
9. Pukhliy V. A. A method of the analytical decision of two-dimensional regional problems for systems of the elliptic equations. – J. Will calculate. mathem. and mathem. Physicists, 1978. 18, №5, p.1275-1282.
10. Pukhliy V. A. About one approach to the decision of regional problems of mathematical physics. - The differential equations, 1979, 15, №11, p.2039-2043.
11. Pukhliy V. A. The decision of nachalno-regional problems of mathematical physics the modified method consecutive approaches. - The Review of applied and industrial mathematics, 2017, vol. 24, rel.1, p.37-48.
12. Emeljanov I.J., Mihan V. I, Solonan V. I. Designing of nuclear reactors: the Manual for high schools. Under the general red. N.A.Dollezhalja. - M: Energyizdat, 1982. - 400 p.
13. Leskin S.T., Shelegova A.S., Slobodchuk V. I. Physical features and a design of reactor ББЭР-1000. The Manual. - M: Publishing house NIJAU "MIFI", 2011. - 116 p.
14. Vlasov V. Z. The general theory of covers and its application in the technician. – M: Gostechizdat 1949. - 784 p.
15. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximation. – New York-London. Academic Proc. Inc., 1975. – 608 p.
16. Lanczos K. Prakticheskie methods of the applied analysis. - M: Fizmathgiz, 1961. - 524 p.
17. Pukhliy V. A. An analytical method of the decision of regional problems of the theory of covers. - Works XIII Conf. under the theory of plates and shells. IV. - Tallinn: Publishing house TPI, 1983. p.101-107.
18. Pukhliy V. A. The decision of a problem on a bend oblique-angled in respect of the cylindrical three-layer panel modified методом consecutive приближений. - The Applied mechanics, 1986, vol. 22, №10, p.62-67.
19. Gibbs J.W. On the equilibrium of heterogeneous substances. – Trans. of the connectial Academy. – New-York, 1876. – 146 p.
20. Weiner J.H. A uniqueness for the coupled thermoelectric problem. - Quart. of Appl. Math., 1957, vol.15, №1. – 44 p.
21. Kochin N.E. Vector calculation and the beginnings tensor calculations. - M: Publishing house AN of the USSR, 1961. – 348 p.

УДК 534.2:532.5

Гидродинамическая акустика. Сообщение 4. Уравнения движения маловязкой жидкости. Уравнения гидродинамической акустики

В.А.Пухлий¹, К.В.Пухлий²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7

г. Севастополь, 299015, Россия, e-mail: pu1611@rambler.ru

²АО «Аэротекс», 127349, Москва, ул. Мурановская, 17-147

Статья поступила 18.04.2019 г.; после доработки 22.04.2019 г.

Аннотация

Структурные образования типа вихря-решетки и активной вихревой дорожки в различных сочетаниях позволяют строить расчетные схемы отрывных обтеканий различных тел с вычислением аэродинамической силы сопротивления и кинетики ближнего следа. Этот путь связан с введением в уравнения движения новых (силовых) членов, описывающих на основании принципа Аппеля касательные взаимодействия, связанные с движением вихревых структур во внешнем поле течения. Опираясь на принципы Аппеля удалось с новых позиций взглянуть на природу возникновения вихревого звука, что позволило каждой гидродинамической структуре поставить во взаимно однозначное соответствие ее акустический образ (диполь, квадруполь).

Ключевые слова: структурные модели, вихрь-решетки, принцип Аппеля, вихревой звук, уравнения маловязкой жидкости, уравнения гидродинамической акустики

Hydrodynamic acoustics. The message 4. The movement equations viscous liquids. The equations of hydrodynamic acoustics

V.A.Pukhliy¹, K.V.Pukhliy²¹Sevastopol state University, 299015, Russia, Sevastopol, Kurchatova Street, 7²Aeroteks Enterprise, 127349, Moscow, street Muranovsky, 17-147

Received 18.04.2019 y.; received in final form 22.04.2019 y.

Abstract

Structural educations of type of a whirlwind-lattice and active vortical path in various combinations allow to build settlement schemes spasmodic flows of various bodies with calculation of aerodynamic force of resistance and kinetic a near trace. This way is connected with introduction in the equations of movement of the new (power) members describing on the basis of principle Appel tangents of interaction, connected with movement of vortical structures in an external field of a current. Leaning against principles Appel it was possible to look from new positions at the nature of occurrence of a vortical sound that has allowed each hydrodynamic structure to put in biunique conformity its acoustic image (a dipole, quadropole).

Keywords: Structural models, whirlwinds-lattices, principle Appel, vortical sound, the equations viscons liquids, the equations of hydrodynamic acoustics

Введение

В предыдущих работах авторов [1-3] были рассмотрены структурные модели обтекания тел, а также модель струйного истечения, составляющими элементами которых являются вихревые образования.

Структурные образования типа вихря-решетки и активной вихревой дорожки в различных сочетаниях позволяют строить расчетные схемы отрывных обтеканий различных тел с вычислением аэродинамической силы сопротивления и кинетики ближнего следа.

Вышеприведенный структурный анализ был распространен также и на турбулентное движение [2]. Структурные картины турбулентного следа за плохо обтекаемым телом предполагается исходной при акустическом анализе явления обтекания тела жидкостью [3].

Вихревой звук

Рассмотренная выше задача о воздействии нестационарного импульса внешнего поля на одиночный вихрь и ее обобщение на случай ламинарного и турбулентного вихревых слоев [2, 3] неразрывно связаны с проблемой возникновения вихревого звука. Как было показано, в ответ на воздействие внешнего изменяющегося поля давлений происходит смещение вихрь-решеток на уровне всех структур, образующих основной вихрь, а также и его самого. Каждая из таких $2n + 1$ подсистем в иерархической лестнице $(K - n) \subset (K - n + 1) \subset \dots \subset (K - 1) \subset K \subset (K + 1) \subset \dots \subset (K + n)$ ($K + n$ – наиболее крупная вихревая система, вихрь-решетка, $\subset$ – знак вложения; $K > n$) имеет свое время запаздывания $\delta t_{(K-i)}$ ($i = 1, 2, 3 \dots j, j+1, \dots n$). Во время запаздывания движение вихревых трубок на любом уровне вложения представляет из себя сдвиговое смещение этих трубок, ведущих себя подобно непроницаемым жидким телам*). Возникающие вследствие сдвигового смещения местные касательные напряжения исчезают за время δt согласно принципу Аппеля и движение вновь приобретает идеальный характер, т.е. в соответствии с законом Био-Савара и отвечающей ему ямой давления внутри вихря-решетки. В период же времени $\Delta t < \delta t$ закон Био-Савара выполняется частично. Этим объясняются пульсации скоростей, особенно отчетливо проявляющиеся в турбулентном движении. В самом деле, во время $\Delta t < \delta t$ в силу частичного выполнения закона Био-Савара, скорости вблизи границ вихря-решетки с внутренней и внешней ее стороны будут сильно отличаться друг от друга. Эти относительные различия и представляют из себя пульсации скоростей. Так как время запаздывания для более мелкого вихря меньше,

то отклик его на воздействие внешнего импульса будет короче.

Таким образом, мы имеем целый спектр пульсаций, особенно четко «просвечивающийся» в случае турбулентного движения [4].

В общем случае импульс внешнего поля имеет непростое строение, что может вызвать учащенный отклик на внешние изменения со стороны более мелких вихрей. Как уже отмечалось выше, это касается как несжимаемой так и слабо сжимаемой жидкости. В случае несжимаемой жидкости тело ограничивается пульсационными изменениями внутри вихря-решетки при воздействии на него внешнего поля и влияния их на его окрестности. В случае же слабо сжимаемой жидкости взаимодействие системы вихрь-решетка плюс внешний поток ведет кроме того к возникновению акустического поля.

На основании рассмотренного выше характера взаимодействия вихря-решетки с внешним потоком, возникновение вихревого звука связано со сдвиговыми перемещениями вихревых трубок под действием внешнего поля давления, изменение в котором проходит через них. Эти трубки ведут себя подобно непроницаемым жидким телам, имеющим в течение времени запаздывания δt независимые от внешнего потока перемещения. При этом в области завихренности имеем:

$$\text{rot rot } \vec{v} \neq 0. \quad (37)$$

Такое движение показывает, что классическая акустика [5] является причиной порождения звука. Таким образом, каждая вихревая подструктура в структуре вихревого образования (вихря-решетки) является в течение времени $\Delta t \leq \delta t$ самостоятельным излучателем звука и такие важные вопросы аэродинамической акустики как характер излучения (дипольный, квадрупольный), интенсивность его, направленность и т.д. могут быть сведены к задаче о движении этих подструктур, вплоть до наибольшего их ансамбля.

Лайтхилл с помощью своего уравнения (12) установил соответствие между акустическим полем и пульсационным гидромеханическим полем, выражаемым тензором напряжений T_{ij} . На основе модели вихря-решетки соответствие это приобретает взаимно-однозначный характер, что естественным образом вытекает из строения вихря-решетки как ансамбля вихревых структур, вложенных друг в друга, каждая из которых,

*) Это качество определяется следующим образом. Если любое твердое тело мы будем представлять абсолютно непроницаемым, т.е. прохождение посторонних масс через его границы будет отсутствовать $\Delta M = 0$ (ΔM – прохождение масс), а для «абсолютно прозрачных тел» $\Delta M = 1$, то наше жидкое тело подчинено соотношению $0 < \Delta M < 1$.

вплоть до мельчайших вихрей из вязкой подобласти [4] является (как показано выше) источником пульсаций и однозначно связанного с ними вихревого звука. Частота пульсаций и вихревого звука для каждого составляющего вихорька определяются его временем запаздывания. Необходимо только иметь в виду, что в нашем случае это не просто пульсация в каждой точке пространства – континуума (как у Лайтхилла), а пульсационная область, связанная вихрем-решеткой на любом уровне его вложения и по ширине равная примерно диаметру его. Это соответствие можно записать известным образом [4]:

$$K = \frac{1}{D}, \quad (38)$$

где K – волновое число, D – размер вихря.

Именно такой пульсационной области однозначно соответствует звук определенной частоты и фазы. Поэтому все, что говорилось выше относительно пульсаций, целиком относится и к вихревому звуку.

В частности, необходимо указать на уже описанное выше появление в следе за телом более слабых пульсаций удвоенной частоты [6]. Это явление, с точки зрения изоморфизма (взаимно однозначного соответствия), идентично появлению квадрупольного звука меньшей интенсивности, имеющего удвоенную частоту по сравнению с дипольным в точке отрыва [7].

Описывая это явление в терминах звукового поля, нетрудно, на основании изоморфизма, предвидеть спектр пульсаций. Нетрудно объяснить эффект Пауэлла (возникновение звука при образовании кольца), если рассмотреть любое сечение кольца.

Воздействие на него встречного импульса давления приводит к резкому торможению и появлению на время запаздывания δt дипольного вихревого звука с максимальной интенсивностью в начальный момент движения по нормали к плоскости кольца.

Такое объяснение, с точки зрения изменений в локальной области завихренности, позволяет избежать излишних построений, связанных с фиктивными полями [8], а заодно и сблизить богатые по содержанию работы Пауэлла [8] с работами Лайтхилла [9].

Пространство завихренности, структуризованное вышеописанным способом, в виде последовательности вложенных друг в друга вихрей-решеток, удовлетворяют в своем движении уравнению (2), основанному, как

известно, на континуальных соображениях. Однако решение этого уравнения для свободного потока с вихревыми структурами будет существенно иным, чем имеющиеся в настоящее время [7]. Воздействие изменяющегося внешнего поля давлений на внутреннюю область вихря-решетки за период времени запаздывания δt_{K-i} каждой из подструктур, составляющих структуру вихря-решетки, в том числе и для него самого, эквивалентно полю массовых сил.

В самом деле, на основании приведенного выше анализа, каждую из составляющих структур (вихрей-решеток) можно рассматривать как непроницаемое жидкое тело, в течение своего времени запаздывания движущееся независимо от внешнего потока (закон Био-Савара не соблюдается).

Таким образом, задача сводится к случаю перемещающейся в жидкости границы тела, характеризующейся, как известно, появлением на этой границе поля массовых сил.

Это свойство непроницаемости, как показано выше, характерно для каждой составляющей подструктуры в структуре вихря-решетки. Последнее означает, что, с точностью до размера поверхности мельчайших вихрей из вязкой подобласти [4], все тело вихревого ансамбля находится под воздействием массовых сил.

Для простейшего импульса, рассмотренного выше, это воздействие определяется временем запаздывания, в более же сложном случае непрерывно меняющегося внешнего импульса поля оно может продолжаться неограниченно долго.

Можно еще сослаться на Гельмгольца [10], согласно которому образование скрытых движений эквивалентно воздействию добавочного силового поля.

Таким образом, решение уравнения Лайтхилла для свободного потока (источники и массовые силы отсутствуют) в общем случае будет иметь вид:

$$\rho - \rho_0 = \frac{1}{4\pi C_0^2} \left\{ \sum_{K=1}^N \left(\sum_{l=1}^L \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\int_{S_{K-l}} \frac{[T_{nj}] n_j ds}{r} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} \int_{V_\omega} \frac{[T_{nj}] dV}{r} \right\}, \quad (39)$$

где V_ω – объем вихревой области Ω ; S_{K-i} – поверхность $(K-i)$ вихря-решетки, $(K-i) \subset \Omega$; L – число $(K-i)$ структур; N – число

вложений; T_{nj} – нормальная компонента тензора T_{ij} (3) на границе вихря; n_j – направляющие косинусы внешней нормали к S_{K-i} ; r – расстояния от точки поверхности S_{K-i} или объема V до точки наблюдения. Величины в квадратных скобках берутся со временем запаздывания $t - r/C_0$.

Выше подробно рассматривалось взаимодействие ламинарного и турбулентного вихревых слоев с внешним потоком.

Для ламинарного слоя, вследствие равенства давлений с обеих сторон, изменение внешнего поля давлений вызовет появление антисимметричных пульсаций скорости и градиентов давлений внутри вихря-решетки, вследствие чего первый член в уравнении (39) становится существенно меньше второго и им можно пренебречь. В результате мы имеем квадрупольное поле излучения.

Для турбулентного вихревого слоя в силу неравенства давлений по границам рассматриваемого вихря происходит в начальный момент времени два движения: одностороннее смещение всех составляющих вихрей-решеток, включая основной вихрь в направлении воздействия импульса внешнего поля, порождающее дипольный звук и антисимметричное смещение с двух сторон вихревого слоя, порождающее квадрупольный звук.

В случае больших градиентов давлений с двух сторон слоя и малой толщины его, как например, в зоне ближнего следа сзади обтекаемого тела, превалирует дипольное излучение, и квадрупольным членом можно пренебречь.

В общем случае необходимо учитывать оба члена. Нетрудно установить ориентацию акустического поля.

Например, в случае неравенства давлений (дипольное излучение) наибольшая его интенсивность совпадает с направлением градиентного поля давлений, что в случае обтекаемого тела означает, что наибольшая его интенсивность имеет направление перпендикулярное набегающему потоку. Нетрудно исследовать и другие примеры, связанные с вихревым излучением.

Все они основаны на знании гидродинамического движения вихря-решетки и составляющих его структур. На этом закончим рассмотрение второго случая, основанного на нестационарном взаимодействии вихря-решетки

с внешним потоком.

Таким образом, всякой заданной гидродинамической вихревой структуре может быть поставлен во взаимно-однозначное соответствие определенный акустический излучатель, объем которого в точности соответствует объему рассматриваемой гидродинамической структуры (в частности, составляющего вихря-решетки на любом уровне вложения, включая основной ансамбль и т.д.). В связи с этим акустический анализ ближнего и дальнего турбулентных следов сзади плохо обтекаемого тела позволяет сделать следующее общее заключение: дипольное излучение существует по всей области сзади тела, однако максимальная его интенсивность ограничена зоной ближнего следа, особенно областью вихревых слоев, состоящих из вихрей-решеток Γ_1 (рис.13) высокой интенсивности и отходящими сзади нее вихревыми образованиями Γ_4 , которые также можно считать акустическими диполями.

Остальные диполи Γ_3 , Γ_5 имеют, по сравнению с первыми, относительно невысокую интенсивность.

Как уже говорилось выше, область акустических квадруполей охватывает всю область сзади тела, однако в области ближнего следа их интенсивностью можно пренебречь и только в области дальнего следа вклад их в общую интенсивность излучения увеличивается. Интересно обратить внимание на введенную нами выше вихревую структуру Γ_2 , образующуюся в результате протекания струек через вихревые слои.

Она представляет их себя группу из четырех вихрей взаимно-встречного вращения (рис.10). Каждая из взаимных пар может быть охарактеризована как акустический квадруполь.

В самом деле, непрерывный взаимообмен пульсациями давлений с окружающими структурами ведет к «расщеплению» обеих вихрей-решеток, приводящих к периодическому сближению или удалению друг от друга вихревых элементов, что, с точки зрения классической акустики, характеризует квадрупольное излучение.

Пренебрегая дипольным и квадрупольным излучением в области дальнего следа и сводя его только к области ближнего следа, можно воспользоваться введенной выше расчетной схемой обтекания (рис.3 и 13). Тогда решение уравнения Лайтхилла для излучающего

свободного потока сзади тела примет вид:

$$\rho - \rho_0 = \frac{1}{4\pi C_0^2} \left\{ \sum_{K=1}^N \left(\sum_{l=1}^L \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\int_{S_{K-i}} \frac{[T_{nj}] n_j ds}{r} \right] \right)_l \right\}_K +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} \int_{AK+BK+S} \frac{[T_{nj}] dV}{r}$$

$$(K-i) \subset AK + BK, \quad (40)$$

где АК и ВК – области вихревых слоев дорожки ближнего следа; S – область буферного слоя.

В уравнении (40) можно пренебречь вторым членом, поскольку он относительно мал и акустическое излучение можно с достаточной степенью точности оценить первым членом.

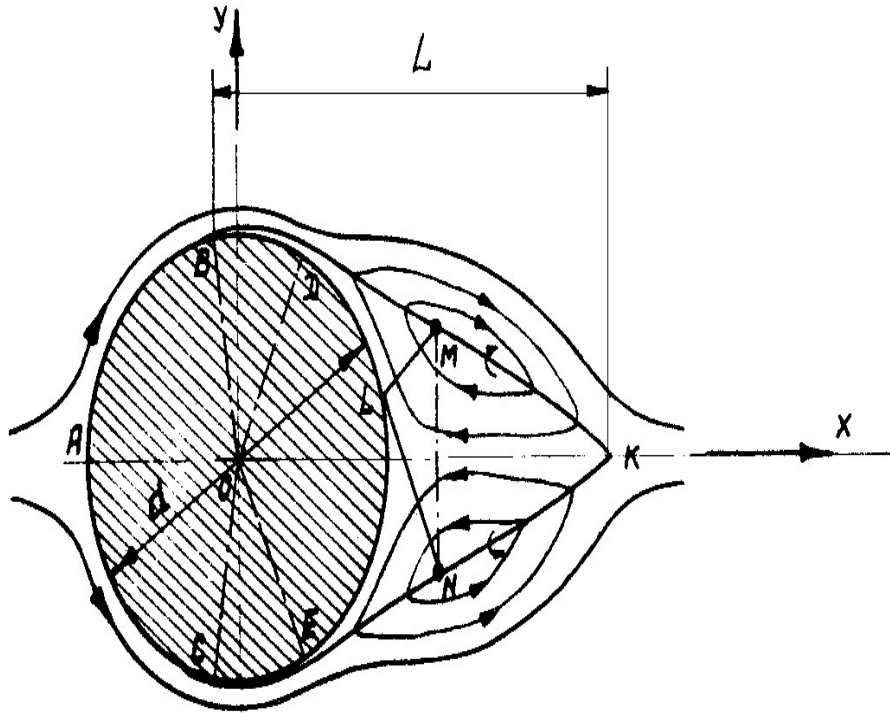


Рис.17. Расчетная схема обтекания цилиндра с отрывом (закритический режим): АВ, АС – зоны ламинарного следа; ВД, СЕ – зоны турбулентного пограничного слоя; ДК, ЕК – зоны свободного турбулентного следа (ближнего следа).

Как уже было показано выше (лемма 2) вихрь-решетку можно рассматривать как упругую систему, в общем случае нелинейным образом зависящую от ряда параметров, из которых важнейший – время запаздывания δt .

Например, увеличение завихренности и связанное с этим увеличение градиента скорости по поперечному сечению вихревого слоя ведет к уменьшению времени запаздывания (формула 36). Это в свою очередь приводит к смещению области энергонесущих вихрей в сторону более высоких частот колебаний. Так как с увеличением частоты колебаний интенсивность излучения звука растет, то более тонкий слой отрыва будет излучать более интенсивный звук. Поэтому утолщение слоя отрыва, приводящее к увеличению расстояния между вихрями, и, тем самым, снижающее

область частот энергонесущих вихрей, приводит к уменьшению интенсивности излучения.

Тела с изменяемой точкой отрыва (цилиндры) и хорошо обтекаемые тела

Сказанное в предыдущем разделе целиком относится к телам с изменяемой точкой отрыва и хорошо обтекаемым телам в закритическом режиме обтекания [11]. Область турбулентного слоя пополняется за счет части его (ВД и СЕ, рис.17), приходящейся на границы тела.

структура и размеры пограничного слоя – на рис.18, полная структурная схема отрывного следа – на рис.19.

Стационарный характер образуемого закритического течения должен обуславливать хорошее совпадение между рассматриваемой

стационарной схемой и действительным течением.

Расчетная схема представлена на рис.17,

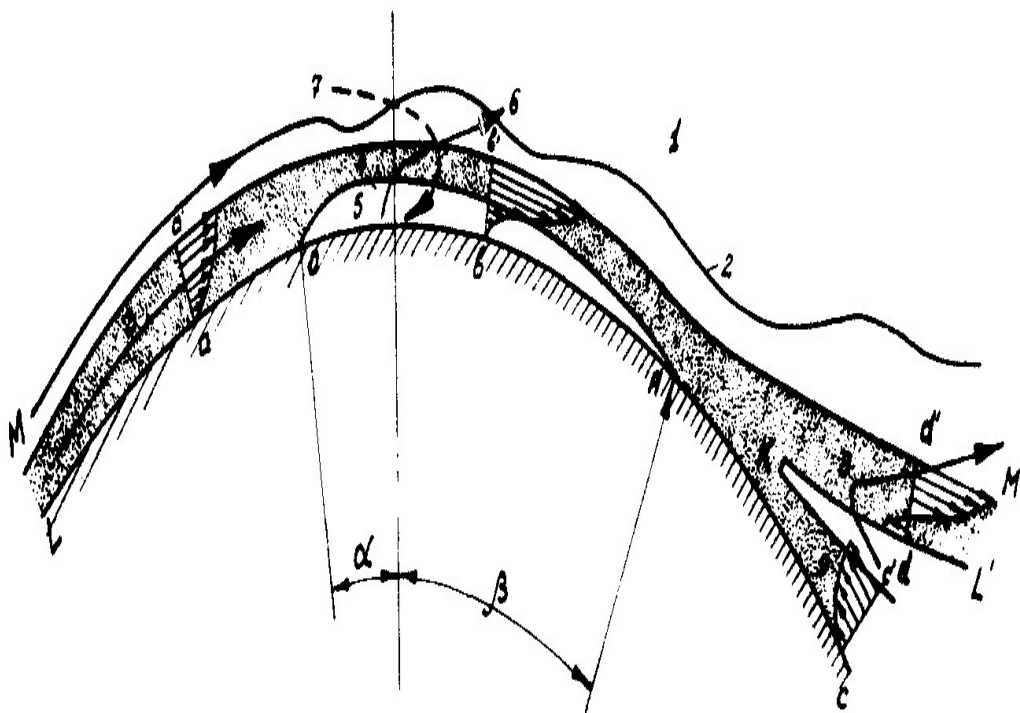


Рис.18. Схематическая структура пограничного слоя на цилиндре и в месте отрыва: MM' – внешняя граница слоя; LO – внутренняя граница ламинарного слоя; OA – внутренняя граница турбулентного пограничного слоя; AC – внутренняя граница слоя на цилиндре с тыльной стороны; KL' – внутренняя граница свободного слоя.

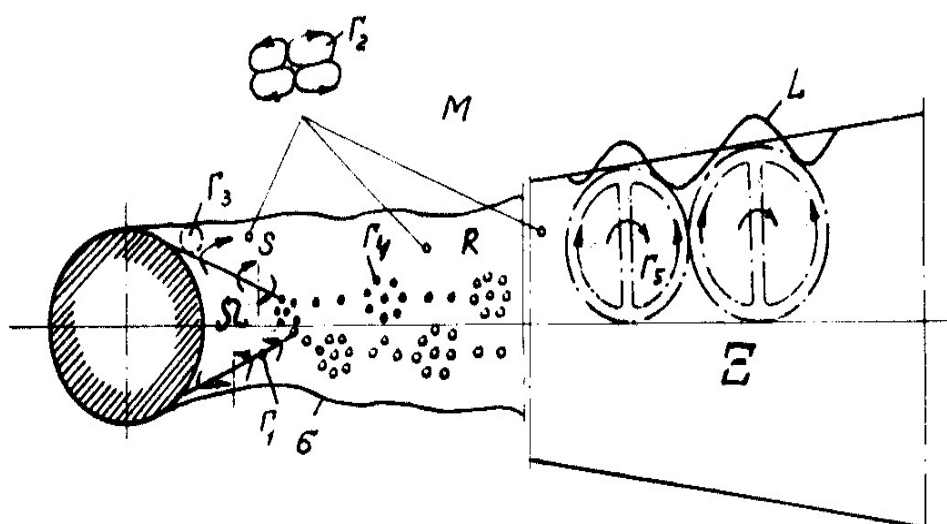


Рис.19. Структурная схема отрывного течения за цилиндром (закритический режим обтекания): Ω – область разрежения; S – область буферного квадрупольного слоя; R – переходный слой; Ξ – область дальнего слоя.

Турбулентные струи

Расчетная схема для турбулентной струи показана на рис.20. Впервые такая схема без учета турбулентности была предложена А.Я.Миловичем [12].

Вихри, обрамляющие внутренний поток, ответственны за кинематику и динамику потока во всей области истечения и вне ее и расчетная схема должна строиться с учетом согласования вихревого воздействия с граничными условиями.

В слое до смыкания интенсивным фактором является дипольное излучение, которое на более далеком расстоянии сильно падает, и квадрупольное излучение, охватывающее область смещения, переходный и дальний следы, становится преобладающим. Этим, очевидно,

объясняется и переход от дипольного излучения к квадрупольному при увеличении скорости истечения струи [9]. В самом деле, при увеличении скоростей в насадке, возникает отрыв, и область ближнего следа резко уменьшается, что ведет к уменьшению дипольного излучения и увеличению доли квадрупольной составляющей.

Уменьшения шума струи можно добиться, как и при обтекании тела, за счет утолщения вихревого слоя на выходе струи из насадки, что ведет к уменьшению градиента средней скорости, а значит и интенсивности излучения.

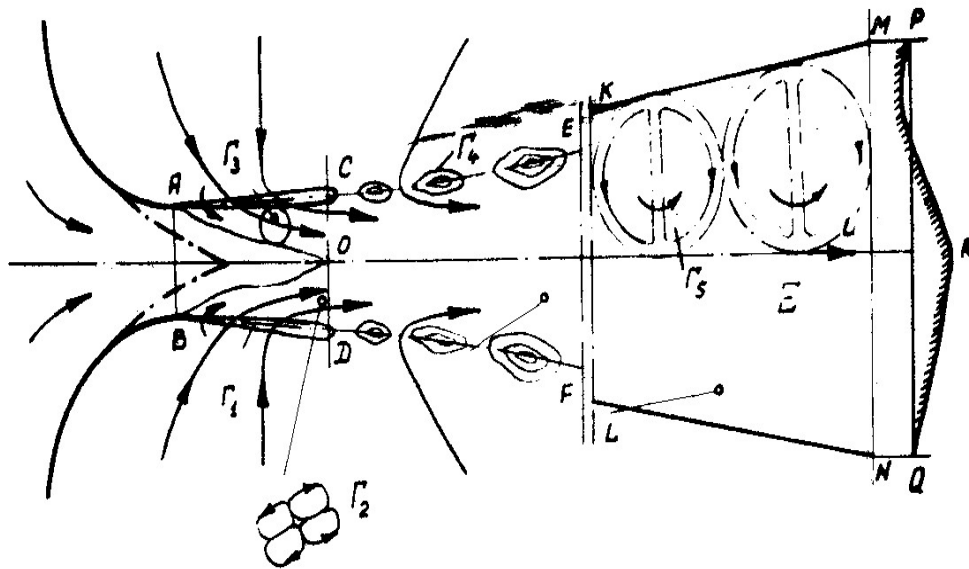


Рис.20. Форма струи и структура образующих ее элементов: АОВ – начальный участок; ОАС и ДВО – зоны смещения; ДСЕФ – переходный участок струи; КМЛН – основной участок; PRQ – мгновенный профиль давления; $\Gamma_1, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ – вихри-решетки одностороннего вращения;

Γ_2 – вихревой квадруполь.

Реализация модели вихря-решетки в экспериментах

Воздействие внешнего поля на вихрь-решетку аналогично наложению на основной вихрь двух дипольных квазивихрей, имеющих взаимно-обратное вращение.

Идея получения квазивихревого движения во вращающемся вихре и была принята при экспериментальном доказательстве реальности введенной модели вихря-решетки [13, 14].

Эксперимент проводился на круглом гидродинамическом стенде с достаточно большой поверхностью водного зеркала, чтобы исключить влияние границ стенда. Основной

вихрь получался в результате вращения решетчатого колеса диаметром $D = 280$ мм, основу которого составили цилиндрические стерженьки $d = 4$ мм, расположенные на некотором расстоянии друг от друга и объединенные по 9 штук с целью образования формы профиля (всего 36 профилей).

Вращение колеса осуществлялось через привод, вал которого не касался воды. Визуализация потока проводилась с помощью бумажного конфетти диаметром 1,3 и 2 мм, опыт повторялся неоднократно, и каждый раз можно было наблюдать следующее.

В начальный момент образуется обычный вихрь, о чем говорит воронка, возникающая в

центре его, и концентрические траектории.

Затем происходит «заваливание» течения, т.е. проникновение части потока внутрь колеса с образованием зоны концентрации завихренности, значительно более сильной, чем в начальный момент. Переход осуществляется достаточно быстро. Важно при этом отметить, что моментные усилия, незначительные в начальный период, во время перехода ко второму, устойчивому виду течения, резко возрастают. При этом возникает вращение зоны концентрации завихренности в сторону движения колеса. Скорость этого вращения значительно ниже скорости основного движения.

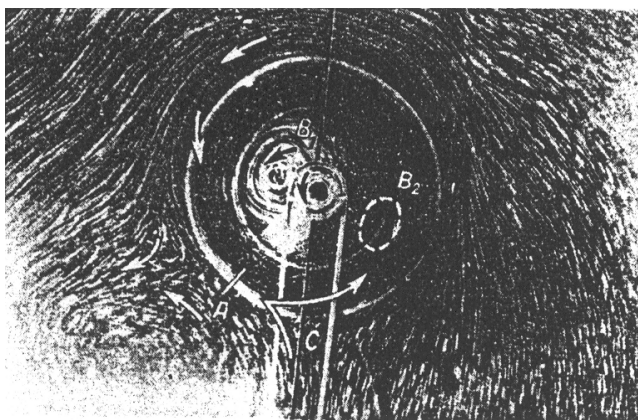


Рис.21. Фотография вихря и форма движения им образуемая.

Картина течения в состоянии абсолютного движения фиксировалась фотоаппаратом. На рис.21 приведена картина окончательного (установившегося) течения, которая подтверждает теоретическое предположение [13, 14] о возникновении квазивихревого движения внутри вихря-решетки при несимметричном воздействии на него внешнего поля.

Анализ полученного движения показывает, что течение образовано основным вихрем-решеткой и двумя квазивихрями взаимно противоположного вращения, один из них, вращающийся в ту же сторону, что и основной вихрь, ясно виден на рис.21 (вихрь B_1). Воздействие второго квазивихря B_2 , противоположного первому, можно определить на основании линий тока в зоне А – С, изогнутых в сторону, противоположную вращению основного вихря. Это может быть только в том случае, если центрально-симметрично к первому вихрю B_1 находится

второй вихрь B_2 , имеющий противоположное вращение (ориентировочно положение его показано на рис.21 пунктиром). Вектор $\overrightarrow{AO}$, проходящий через центр основного вихря перпендикулярно к отрезку $B_1 B_2$, соединяющему центры квазивихрей, определяет направление импульса внешнего поля, а точка А на окружности основного вихря является точкой раздела линий тока, т.е. точкой наибольшего давления.

Вращение квазивихревого поля или, что то же самое, зоны концентрации завихренности, которое можно назвать собственным, т.е. присущим данному типу вихря-решетки при воздействии на него внешнего поля, теоретически было предсказано в работе [13]. Полученные экспериментальные результаты подтверждают теоретические выводы, а заодно и реальность введенной модели вихря-решетки.

Уравнения движения маловязкой жидкости

В настоящее время принято считать, что уравнения Навье-Стокса способны описывать любые движения вязкой жидкости как ламинарные, так и турбулентные.

При анализе турбулентных течений широко применяется следующая операция [4]: полная скорость u выражается в виде суммы средней $\bar{u}$ и пульсационной u' скоростей: $u = \bar{u} + u'$ с последующей подстановкой этого выражения в уравнение движения. Нетрудно видеть [4], что такая операция с физической точки зрения означает переход к полю завихренности. Подстановка приведенного выражения в уравнение движения с последующим его осреднением позволяет получить видоизмененные уравнения, в которых появляются пульсационные члены вида $\rho u_i u_j$ [4], воспринимаемые как силовые, в связи с чем они носят название напряжений Рейнольдса. На самом деле они отражают реакцию жидкого моля (левая часть уравнений движения) на внешний силовой импульс. Не внося ничего нового с точки зрения причинно-следственных связей в уравнения движения, эта операция оставляет открытым очень важный вопрос о полноте уравнений Навье-Стокса. Возникает вопрос, возможно ли описание движения вихревых структур и связанных с ними полей завихренности турбулентных и ламинарных вихревых слоев в пределах уравнений Навье-

Стокса? Ответ, как показывает вышеприведенный анализ нестационарного взаимодействия вихревых структур с внешним полем, является отрицательным. Нетрудно видеть, почему это так: основанные на идеях и методах молекулярной механики или на представлении среды как континуума, уравнения не могли учесть особенностей, связанных с конечными структурными образованиями, качественно отличными от самой среды элементами, являющимися, по выражению Д.К.Максвелла [15], «способами движения» этой среды. Следовательно, решение вопроса полноты уравнений выходит за пределы собственно кинематических построений. Оно основано на привлечении новых данных о природе взаимодействия вихревых структур с внешней средой. Для жидкости достаточно малой вязкости вышеприведенный анализ нестационарного взаимодействия вихревых структур с внешним полем [13, 14] указывает путь, на котором можно добиться полноты уравнений движения. Этот путь связан с введением в уравнения движения новых (силовых) членов, описывающих на основании принципа Аппеля касательные взаимодействия, связанные с движением вихревых структур во внешнем поле течения.

Таким образом, в общем случае уравнения движения вязкой жидкости (при условии достаточно малой вязкости) примут вид:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} +$$

$$+ \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \operatorname{sign} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} \right),$$

(41)

где $i, j = 1, 2, 3$; $\tau_{ij}(x_i, t)$ – касательные напряжения в каждой точке нестационарного поля завихренности;

Сигнатура, входящая в уравнение движения (41) записывается следующим образом:

$$\operatorname{sign} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \neq 0, \\ 0, & \text{если } \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0. \end{cases}$$

Появление члена с касательными напряжениями τ_{ij} , возникающими в областях завихренности, замыкает причинно-следственную связь в уравнениях движения, тем самым значительно расширяя возможности их применения в целом ряде как теоретически, так и практически важных задач, таких, как сопротивление движущихся тел, струйные истечения и др.

Уравнения движения (41) объясняют ряд важных вопросов, как, например, увеличение энергии и момента количества движения внутри поля завихренности.

С помощью этих уравнений можно рассматривать отрывные течения с различными давлениями с внешней и внутренней сторон вихревых слоев, следствием чего является пронзание их струйками тока, и т.д.

Следует отметить, что касательные напряжения локализованы, как это следует из уравнений (41), лишь в границах вихревых структур, составляющих вихревой ансамбль. Радиус действия сил R_α можно записать следующим образом:

$$R_\alpha = \rho(1 + \alpha), \quad (42)$$

где ρ – радиус вихря, $\alpha \ll 1$.

В связи с изложенным напрашивается аналогия с полями «ядерных сил», локализованных в пределах ядра с весьма коротким сроком их действия. Одновременно воздействие по закону Био-Савара можно сравнить с электромагнитным.

Уравнения аэродинамической акустики

Приведенный выше анализ можно распространить и на уравнения аэродинамической акустики. Процесс возникновения аэро-динамического звука связан, как показано в работе [13] со следующим: в результате сдвигового перемещения вихревых трубок, составляющих вихревой ансамбль, под воздействием меняющегося внешнего поля давлений, трубки в течение весьма короткого времени (времени запаздывания δt) ведут себя подобно непроницаемым жидким телам, имеющим в течение этого времени независимые от внешнего потока перемещения (закон Био-Савара не соблюдается).

Такое движение, как показывает классическая акустика [5], является причиной порождения звука. При этом в области

завихренности выполняется следующее соотношение:

$$\text{rot rot } \vec{u} \neq 0. \quad (43)$$

В общем случае под воздействием постоянно меняющегося внешнего поля давлений сдвиговое смещение трубок осуществляется постоянно, поэтому каждая трубка в вихревом ансамбле будет непрерывно излучать звук.

Рассмотренное взаимодействие вихря-решетки с внешним полем можно характеризовать как пульсационное. Локальные в своем проявлении, пульсации являются результатом постоянно образующегося несоответствия между скоростными полями внутри вихрей-решеток и вне их из-за возникновения на весьма короткий момент в пределах вихревых структур явлений сдвига и связанных с ними касательных напряжений τ_{ij} и последующего восстановления соответствия во взаимном движении, за счет возвращения к качению.

Поэтому, исходя из более общих позиций, рассмотренных выше, ответственность за возникновение вихревого звука необходимо отнести не за счет пульсационных составляющих потока, а за счет касательных напряжений сдвига, что, очевидно, и должно найти отражение в уравнениях аэродинамической акустики [14]:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - C_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = -\frac{\partial F}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}; \quad (44)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - C_0^2 \rho \delta_{ij}. \quad (45)$$

Тензор напряжений от сил давления, касательных (сдвиговых) напряжений и вязкости P_{ij} определится по формуле [14]:

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \tau_{ij} \text{sign} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{3}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right), \quad (46)$$

Где ρ – плотность; C_0 – скорость распространения возмущения; F – массовая сила на единицу объема; $\rho u_i u_j$ – тензор пульсационных напряжений; μ – коэффициент обычной вязкости; δ_{ij} – символ Кронекера; τ_{ij} – касательные напряжения сдвига.

Введение касательных напряжений сдвига в уравнения аэродинамической акустики

позволяет уяснить истинную причину возникновения вихревого звука на границах движущегося тела и области свободного потока. То же можно сказать и о струйных истечениях.

Для перехода от уравнений, описывающих движение в силовой форме через составляющие тензора напряжений (46) к уравнениям, представляемым через деформацию локального жидкого объема, необходимо установить связь между напряжением и этой деформацией. Рассмотрим произвольную составляющую вихревой структуры, входящую в локальный объем в момент перехода ее к новому движению. Деформация ее Δ_{ij} за время перехода δt в связанное с этой деформацией поле напряжений τ_{ij} вызовет в свою очередь деформацию этого локального объема и поля напряжений τ_{ij}^σ на его границах. Рассмотрим для простоты в качестве объема элементарный жидкий параллелепипед, что дает в рассматриваемом срезе пространства прямоугольник.

Деформация его в силу линейного распределения в пределах локального объема скоростей перемещений слоев друг относительно друга, а также равенства касательных сил взаимодействия τ_{ij}^σ от поля напряжений τ_{ij} по двум смежным граням прямоугольника может быть выражена через скорости углового перекашивания ε для каждой из трех взаимно перпендикулярных плоскостей следующим образом [16]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (47)$$

Таких выражений в общем случае будет три. Отвечающие этой деформации касательные напряжения по граням параллелограмма будут пропорциональны скоростям углового перекашивания:

$$\tau_{ijl} = a_l 2\varepsilon_k = a_l \left(\frac{\partial u_{il}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{jl}}{\partial x_i} \right), \quad (48)$$

где a_l – коэффициент пропорциональности; l – индекс рассматриваемой вихревой структуры; $i, j = 1, 2, 3$; $l = 1, 2, \dots, N$.

Все остальные положения о связи сил и скоростей выполняются как и в обычных выводах уравнений движения [16] при рассмотрении условий равновесия

элементарного жидкого тетраэдра.

При этом анализ деформации поверхностей токов структурной составляющей вихревого движения показывает, что деформация жидкого элемента имеет вид поверхности эллипсоида с главными направлениями движения или главными осями деформаций и соответственно с главными осями напряжений τ_{ij} .

Подставляя (48) в (41) и совершая стандартные преобразования [16], получим следующие уравнения движения:

$$\frac{\partial E_1}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = 2\rho(u_j \omega_K - u_K \omega_j) - 2 \sum_{l=1}^N a_l \left(\frac{\partial \omega_{Kl}}{\partial x_j} - \frac{\partial \omega_{jl}}{\partial x_K} \right), \quad (49)$$

где

$$E_1 = \rho U + p + \frac{\rho}{2} (u_i \delta_{ij})^2 - \frac{4}{3} \sum_{l=1}^N a_l \frac{\partial u_{il}}{\partial x_i};$$

$$\omega_{Kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{jl}}{\partial x_i} - \frac{\partial u_{il}}{\partial x_j} \right);$$

$$U - \text{силовая функция} \left(\frac{\partial U}{\partial x_i} = F_i \right); \quad p -$$

давление; $i, j, k = 1, 2, 3$.

В случае слабо сжимаемой жидкости уравнения движения примут вид:

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = 2\rho(u_j \omega_K - u_K \omega_j) - 2 \sum_{l=1}^N a_l \left(\frac{\partial \omega_{Kl}}{\partial x_j} - \frac{\partial \omega_{jl}}{\partial x_K} \right) + \alpha, \quad (50)$$

$$\text{где} \quad E = \rho U + p + \rho \frac{(u_i \delta_{ij})^2}{2} - \alpha;$$

$$\alpha = \left| \frac{4}{3} \sum_{l=1}^N a_l \frac{\partial u_{il}}{\partial x_i} \right| \rightarrow 0.$$

С помощью уравнений (41), (49), (50) можно рассматривать различные виды движения (как ламинарные, так и турбулентные) в свободном потоке и у границ тела.

В частности, задание вида и размеров вихревых структур [13, 14] на границе тела, связанных с состоянием набегающего потока, позволяет в ряде случаев достаточно эффективно решить задачи по подсчету значений сопротивления тел.

Из уравнения (44) сравнительно трудно

получить информацию о видах источников звука аэродинамического происхождения. Как и в случае уравнений движения аэрогидромеханики необходимо преобразование исходных уравнений аэродинамической акустики, связанных с вихревыми структурами, с целью более конкретных представлений о вихревых скоростных составляющих потока и в целом об источниках излучения.

Для этого выразим касательные усилия через линейные соотношения их с относительными скоростями деформации среды.

Продифференцируем уравнение неразрывности [17] $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = Q$ по

времени. В результате получаем:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \frac{\partial^2(\rho u_i)}{\partial t \partial x_i} = \frac{\partial Q}{\partial t}. \quad (51)$$

Аналогичным образом продифференцируем уравнение (49) по x_i :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial^2 E_1}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} 2\rho(u_j \omega_K - \omega_K \omega_j) - \frac{\partial}{\partial x_i} 2 \sum_{l=1}^N a_l \left(\frac{\partial \omega_{Kl}}{\partial x_j} - \frac{\partial \omega_{jl}}{\partial x_K} \right). \quad (52)$$

Вычитая (52) из (51) и представляя $E_1 = T_{ij} + U$; $\frac{\partial U}{\partial x_i} = F_i$, получим:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial F_i}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} 2\rho(u_j \omega_K - u_K \omega_j) - \frac{\partial}{\partial x_i} 2 \sum_{l=1}^N a_l \left(\frac{\partial \omega_{Kl}}{\partial x_j} - \frac{\partial \omega_{jl}}{\partial x_K} \right). \quad (53)$$

Прибавляя и вычитая в правой части уравнения (53) выражение $\left(\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \right) C_0^2 \rho \delta_{ij}$,

получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - C_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial F_i}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} 2\rho(u_j \omega_K - u_K \omega_j) - \frac{\partial}{\partial x_i} 2 \sum_{l=1}^N a_l \left(\frac{\partial \omega_{Kl}}{\partial x_j} - \frac{\partial \omega_{jl}}{\partial x_K} \right) + \frac{\partial^2 T_{ij}^*}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (54)$$

$$\text{где } T_{ij}^* = \rho u_i u_j + p_{ij}^* - C_0^2 \rho \delta_{ij};$$

$$p_{ij}^* = p\delta_{ij} - \frac{4}{3} \sum_{l=1}^N a_l \frac{\partial u_{il}}{\partial x_i}. \quad (55)$$

В случае, если $\frac{\partial u_{il}}{\partial x_i} \rightarrow 0$, уравнения аэродинамической акустики примут вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - C_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial F}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} 2\rho(u_j \omega_k - u_k \omega_j) - \frac{\partial}{\partial x_i} 2 \sum_{l=1}^N a_l \left(\frac{\partial \omega_{kl}}{\partial x_j} - \frac{\partial \omega_{jl}}{\partial x_k} \right) - \frac{\partial^2 T_{ij}^*}{\partial x_i \partial x_j} + \alpha_1, \quad (56)$$

$$\text{где } \alpha_1 \ll \left| \frac{\partial}{\partial x_i} 2\rho(u_j \omega_k - u_k \omega_j) - \frac{\partial}{\partial x_i} 2 \sum_{l=1}^N a_l \left(\frac{\partial \omega_{kl}}{\partial x_j} - \frac{\partial \omega_{jl}}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial^2 T_{ij}^*}{\partial x_i \partial x_j} \right|. \quad (57)$$

Уравнения (54) и (56) позволяют по-новому взглянуть на составляющие акустического излучения. Если оставить пока в стороне анализ явления, связанный с монопольным источником звука, то можно констатировать, что все силовые члены, содержащиеся в правой части уравнений, за исключением последнего, являются дипольными излучателями звука. Последний член почти не оказывает влияние на дальнейшее звуковое поле и его влияние определяется зоной псевдозвука.

На основании анализа членов уравнения (54) можно сделать следующий важный вывод: *основными источниками аэродинамического шума являются дипольные источники, а не квадрупольные, как это следует из уравнений Лайтхилла и др. [9, 18].*

Комбинация дипольных источников может давать квадрупольное излучение, как это происходит, например, при ламинарном отрыве. Напротив, дипольный характер излучения присущ вихревой структуре при турбулентном отрыве, когда распределение касательных напряжений и отвечающая им концентрация завихренности носит односторонний характер внутри структуры.

Авторами получено решение задачи об аэродинамическом шуме при обтекании пластинки трехмерным потоком, а также для диска. Полученные интенсивности излучаемого звука близко отвечают экспериментальным, что позволяет сделать вывод о правильности физических представлений, выдвигаемых авторами в области аэродинамической акустики, связанной с изучением звука аэродинамического происхождения.

Заложены теоретические основы для дальнейших практических мероприятий по снижению шума непосредственно в источнике его возникновения, в частности в рабочих колесах радиальных и осевых турбомашин, являющихся наиболее интенсивными излучателями аэродинамического шума.

Улучшение шумовых характеристик при обтекании тел

Как показано выше, основным фактором, уменьшающим интенсивность излучения, является увеличение толщины вихревого слоя в месте отрыва. В работе [19] указано на уменьшение шума в случае применения при обтекании цилиндров с высеченными в них бороздками поперек набегающего потока. Наличие бороздок ведет к увеличению толщины пограничного слоя и снижению градиентов скорости в месте отрыва, а в общей сложности к уменьшению интенсивности излучения и к сдвигу шумовых характеристик в стороны более низких частот. На рис.22 приведено обтекание цилиндра с бороздками и без них.

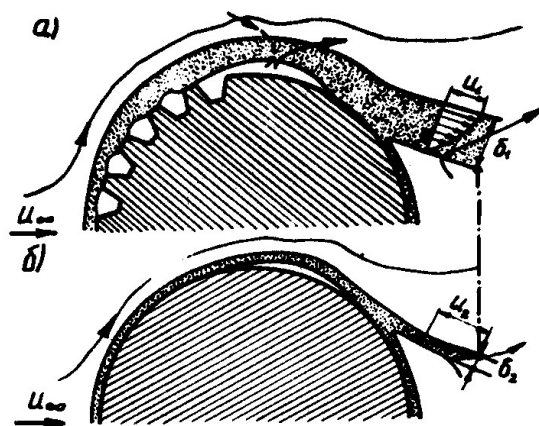


Рис.22. Обтекание цилиндра [19]: а – цилиндр с канавками; б – обычный цилиндр.

Наиболее эффективным решением вопроса борьбы с шумом является устранение шумообразования в самом источнике. Течение воздуха в турбомашине является нестационарным течением турбулентного потока. Основным фактором, уменьшающим интенсивность излучения, является увеличение толщины вихревого слоя в месте отрыва от поверхности. Наибольшее влияние на излучение шума радиальными турбомашинами со спиральным кожухом оказывает язык, расположенный в непосредственной близости к

каналам лопаточного колеса. С целью снижения уровня шума в широком диапазоне звуковых частот разработан радиальный вентилятор с отсекателем, выполненным в виде гребенки, лопатки которой отогнуты поочередно в разные стороны [20].

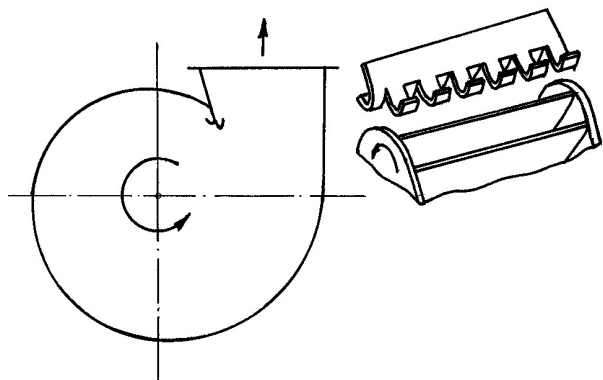


Рис.23. Радиальный вентилятор с отсекателем [20].

На рис.23 показан радиальный вентилятор с отсекателем. Снижение шума достигается за счет установления в месте языка на выходе из вентилятора отсекателя-гребенки, увеличивающего зону завихренности и тем самым снижающего градиенты скоростей, ответственных за интенсивность звукоизлучения.

Выводы

- 1) Опираясь на принцип Аппеля и, используя параметр времени запаздывания δt , удалось с новых позиций взглянуть на природу возникновения вихревого звука. В дальнейшем каждой гидродинамической структуре был поставлен во взаимно однозначное соответствие ее акустический образ (диполь, квадруполь). Таким образом был решен вопрос связи между гидродинамическими и акустическими полями.
- 2) Одним из важных результатов, вытекающих из вышеприведенного структурного анализа гидродинамического и акустического полей, является вывод о том, что в свободном потоке, а также вдоль границ тела, где образуется турбулентный пограничный слой, существует дипольное излучение.
- 3) В нашем анализе всюду рассматривались так называемые «материализованные»

поверхности разрыва, т.е. поверхности разрыва, между которыми есть вихревой наполнитель. Обоснование их на любой случай (например, в случае пронзания их линиями тока) дано в работах [13, 14]. Возникновение вихревого звука тесно связано с временем запаздывания для таких материализованных структур при воздействии на них внешнего импульса. В связи с этим возникает интересный вопрос, а будет ли зарождаться звук в идеальной, слабо сжимаемой жидкости в случае чистых поверхностей разрыва? Нетрудно ответить на него отрицательно.

Список литературы

1. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Соколов В.В., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 1. Структурный подход к уравнениям движения. – Энергетические установки и технологии, 2018, Том 4, №4, с.29-42.
2. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Соколов В.В., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 2. Турбулентное движение жидкости. – Энергетические установки и технологии, 2019, Том 5, №1, с.21-33.
3. Пухлий В.А., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 3. Акустический анализ явления обтекания тел турбулентным потоком жидкости. – Энергетические установки и технологии, 2019, Том 5, №2, с.
4. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизмы и теория. – М.: Физматгиз, 1963. – 342 с.
5. Rayleigh J.W.S. Theory of sound. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1945. – 676 p.
6. Перов Г.И., Штейнберг Р.И. Исследование потока за плохо обтекаемыми телами. – Труды ЦАГИ, вып.482. – 1940. – 20 с.
7. Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound turbulent. – Proc. Roy. Soc. (London), Ser.A, №231, 1955, p.505-514.
8. Powell A. Theory of vortex sound. – JASA, Vol.36, №1, 1964, p.177-195.
9. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. – Proc. Roy. Soc.(London), A 267, №1329, 1962, p.147-182.
10. Helmholtz H. Über die physikalische Bedeutung der Prinzip der kleinsten Wirkung. – J. für reine und angewandte Mathematik, Band 100, Heft 2, 1886, s.137-166.
11. Goldstein S. Modern developments in fluid dynamics. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1965. – 372 p.
12. Милович А.Я. Теория динамического взаимодействия тел и жидкости. – М.: Госиздат лит-ры по строит-ву. – М., 1955. – 311 с.
13. Хвоцевский И.Я., Пухлий В.А. О некотором теоретическом подходе к решению задач аэродинамической акустики. – Труды ЦНИИПромзда-

- ний, вып.38, 1975, с.75-148.
14. *Хвоцевский И.Я., Пухлий В.А.* К уравнениям движения в аэрогидромеханике и аэродинамической акустике. – Труды ЦНИИпромпзданий, вып.55, 1977, с.115-132.
 15. *Maxwell J.C.* Atom. – The scientific papers, vol.11, 1927. – p. 342-374.
 16. *Саткевич А.А.* Теоретические основы гидроаэромеханики. – М.: ИКТП, 1934. – 312 с.
 17. *Авиационная акустика.* – М.: Машиностроение, 1973. – 446 с.
 18. *Миниович И.Я., Перник А.Д., Перовский В.С.* Гидродинамические источники звука. – Л.: Судостроение, 1972. – 480 с.
 19. *Баженов Д.В., Баженова Л.А., Римский-Корсаков А.В.* О влиянии шероховатости поверхности на интенсивность вихревого звука. – В кн.: Вибрации и шумы (физические исследования). – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 128 с.
 20. *Хвоцевский И.Я., Пухлий В.А.* Корпус центробежного вентилятора. – Авт. свид-во №591620. – М.: Бюл. изобрет. №5, 1978.
- ### References
1. *Pukhliy V. A., Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., Pukhliy K.V.* Hydrodynamic acoustics. The message 1. The structural approach to the movement equations. – Scientific magazines “Power plants and technologies”, 2018, vol.4, №4, p.29-42.
 2. *Pukhliy V. A., Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., Pukhliy K.V.* Hydrodynamic acoustics. The message 2. Turbulent movement of a liquid. – Scientific magazines “Power plants and technologies”, 2019, vol.5, №1, p.21-33.
 3. *Pukhliy V. A., Pukhliy K.V.* Hydrodynamic acoustics. The message 3. The acoustic analysis of the phenomenon of a flow of bodies a turbulent stream of liquid. – Scientific magazines “Power plants and technologies”, 2019, vol.5, №2, p..
 4. *Hinze I.O.* Turbulence, its mechanisms and the theory. – M: Fizmathgiz, 1963. – 342 p.
 5. *Rayleigh J.W.S.* Theory of sound. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1945. – 676 p.
 6. *Petrov G. I, Steinberg R. I.* Stream research behind badly streamline bodies. – Works CAHI, rel.482. – 1940. – 20 p.
 7. *Curle N.* The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound turbulent. – Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A, №231, 1955, p.505-514.
 8. *Powell A.* Theory of vortex sound. – JASA, Vol.36, №1, 1964, p.177-195.
 9. *Lighthill M.J.* On sound generated aerodynamically. – Proc. Roy. Soc. (London), A 267, №1329, 1962, p.147-182.
 10. *Helmholz H.* Über die physikalische Bedeutung der Prinzip der kleinsten Wirkung. – J. für reine und angewandte Mathematik, Band 100, Heft 2, 1886, s.137-166.
 11. *Goldstein S.* Modern developments in fluid dynamics. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1965. – 372 p.
 12. *Molovich A.J.* Theory of dynamic interaction of bodies and a liquid. – M: The State publishing house of lits-ry on building. – M, 1955. – 311 p.
 13. *Hvoshchevsky I.J., Pukhliy V. A.* About some theoretical approach to the decision of problems of aerodynamic acoustics. – Works ZNIIpromzdaniy, rel.38, 1975, p.75-148.
 14. *Hvoshchevsky I.J., Pukhliy V. A.* To the movement equations in an aerohydromechanics and aerodynamic acoustics. – Works ZNIIpromzdaniy, rel.55, 1977, p.115-132.
 15. *Maxwell J.C.* Atom. – The scientific papers, vol.11, 1927. – 342-374.
 16. *Satkevich A.A.* Theoretical of a hydroaeromechanics. – M: IKTP, 1934.- 312 p.
 17. *Aviation acoustics.* – M: Mechanical engineering, 1973. – 446 p.
 18. *Miniovich I.J., Pernik A.Д., Perovsky V.S.* Gidrodinamicheskie sound sources. – Л: Ship-building, 1972. – 480 p.
 19. *Bazhenov D.V., Bazhenova L.A., Roman-korsakov A.B.* About influence of a roughness of a surface on intensity of a vortical sound. – in кн.: Vibrations and noise (physical researches). – M: Publishing house "Science", 1969. – 128 p.
 20. *Hvoshchevsky I.J., Pukhliy V. A.* Case of the centrifugal fan. – A bus svid-in №591620. – M: Bull. inventions. №5, 1978. – 4 p

УДК 620.97

Современное состояние развития основных типов неатомных анаэробных двигательных и энергетических установок (обзор)

И. Б. Широков¹, И. И. Марончук²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, shirokov@ieee.org²ООО «Генезис-Таврида», ул. Щербака, 5, г. Севастополь, 299011, Россия, igimar@mail.ru

Статья поступила 25.04.2019 г.; после доработки 30.04.2019 г.

Аннотация

В настоящей статье приведена общая обзорная информация о состоянии развития основных типов неядерных анаэробных двигательных и энергетических установок, представлены их классификация, принципы функционирования, краткая оценка основных преимуществ и недостатков. Рассмотрены основные критерии и требования необходимые при выборе, разработке и создании подобных энергетических установок, отмечена необходимость четкого понимания целей, задач, требований к технико-экономическим и эксплуатационным характеристикам дальнейшего применения объекта на котором такая установка будет эксплуатироваться. Авторы считают, что перспективным является создание «единой», комбинированной (гибридной) анаэробной двигательной и энергетической установки с максимально возможной эффективностью при абсолютном использовании широкого типа топлив и побочных продуктов их реакций, стремящихся к безотходности, и включающей в себя все типы рассмотренных в работе энергетических установок.

Ключевые слова: анаэробная двигательная и энергетическая установка, тепловой двигатель, замкнутый цикл, топливный элемент, аккумуляторные батареи.

The current state of development of the main types of non-nuclear anaerobic motor and energy systems (review).

I. B. Shirokov¹, I. I. Maronchuk²¹FSAE HE «Sevastopol State University», Universitetskaya St., 33, Sevastopol 299053, Russia, shirokov@ieee.org²Genesis-Tavrida Ltd., Scherbak St., 5, Sevastopol, 299011, Russia, igimar@mail.ru

Received 25.04.2019 y.; received in final form 30.04.2019 y.

Abstract

This article provides a general overview of the state of development of the main types of non-nuclear anaerobic locomotives and power plants, presents their classification, principles of operation, a brief assessment of the main advantages and disadvantages. The main criteria and requirements necessary for the selection, development and creation of such power plants are considered; the need for a clear understanding of the goals, objectives, technical and economic requirements and operational characteristics of further use of the facility on which such a facility will be operated is noted. The authors believe that it is promising to create a “single”, combined (hybrid) anaerobic motor and power plant with the highest possible efficiency with absolute use of a wide type of fuels and by-products of their reactions, striving for wastelessness, and including all types of installations.

Keywords: anaerobic motor and power plant, heat engine, closed cycle, fuel cell, batteries.

Введение

Углеводородные ресурсы не безграничны, а стоимость добычи транспортировки и перера-

ботки нефти ежегодно повышается, усугубляя экологические проблемы [1]. Поэтому одним из основных направлений развития современной экономики является поиск перспективных тех-

нологий энергопреобразования и энергосбережения, основанных на принципиально новых, высокоэффективных, инновационных технических разработках (решениях).

В соответствии с «Энергетической стратегией России на период до 2030 года» особенно важным аспектом представляется энергетическая и экологическая безопасность, обеспечение которой непосредственно зависит от исследований и разработок, создания и внедрения инновационных энергетических установок (ЭУ) с освоением новых топлив и источников энергии [2]. В перечне критических технологий Российской Федерации отражены потребности в развитии технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем [3]. В то же время развитие энергетики и энергосбережения отнесены к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в нашей стране [4] и поддерживаются государством, например, программой «Социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года» [5].

Актуальным является создание принципиально новых высокоэффективных ЭУ к которым можно отнести неядерные анаэробные двигательные и энергетические установки (АДЭУ), являющиеся отдельной областью автономной энергетики. АДЭУ используют без связи с атмосферой на различных объектах с широкой степенью применения. Подобные ЭУ уже нашли свое применение при использовании их в подводных аппаратах различных назначений, специальных фортификационных сооружениях, космических аппаратах и станциях [6].

Оценка состояния работ в области исследований, разработок и изготовления АДЭУ показала, что основным направлением их использования в мире является применение как основных и второстепенных (вспомогательных) ЭУ на неатомных подводных аппаратах (ПА) и лодках (ПЛ) [7, 8]. В основном, для решения задачи значительного увеличения продолжительности их подводного хода в сравнении с применяемыми в настоящее время аппаратами, имеющими «классические», например дизель-электрические ЭУ. В реальной эксплуатации сегодня находятся ПЛ с АДЭУ на основе: паротурбинных установок замкнутого цикла (Франция); топливных элементов или электрохимических генераторов (Германия, Испания, РФ); двигателей с внешним подводом теплоты (Япония, Швеция); двигателей внутреннего сгорания по замкнутому циклу (Чили, С. Корея) [9, 10]. Каждая из приведенных

стран выбрала приоритетное направление развития и создания АДЭУ, основываясь на современном состоянии собственного энергомашиностроения [11].

Вышеописанные энергетические установки имеют некоторые общие технические решения. Наличие в разных вариантах комбинированных ЭУ, включающих кроме того дизель-генератор, аккумуляторную батарею, с возможностью размещения анаэробной установки в отдельных отсеках (что делает ее мобильной при использовании в простых дизель-электрических ПЛ). В качестве универсального окислителя для большинства ЭУ используется жидкий кислород, сброс отработанных газов осуществляется в окружающую среду [12].

Активно ведутся работы над ПЛ с полностью анаэробной ЭУ, обеспечивающей все режимы ее функционирования без всплытия в течение всей автономности. Тем не менее, работы пока далеки до завершения [9].

Постановка задачи

Как видно из вышесказанного, интерес в области использования, применения, разработки и создания новых высокоэффективных анаэробных двигательных и энергетических установок в современном мире высок и прорывные работы в данном направлении являются весьма актуальными. При этом в настоящий момент времени, основные типы таких энергетических установок находятся на этапе своего развития, поэтому выбирать и сравнивать их характеристики, определяя наиболее или наименее эффективные ЭУ для использования в неопределенных целях, не представляется возможным.

Целью работы являлась подготовка обзорной статьи (по выпущенной в последнее время литературе) посвященной краткому описанию основных типов неядерных анаэробных двигательных и энергетических установок. Рассматривается их классификация, принципы функционирования, краткая оценка основных преимуществ и недостатков. Кроме того анализируются основные критерии и требования необходимые при их выборе, разработке и создании, рассматривается представление основных фирм (коллективов) разработчиков и изготовителей.

Основная часть

В настоящий момент времени из всего многообразия различных вариантов анаэробных ЭУ, активной всего исследовательские работы идут в области исследований, разработок, создания и

внедрения неатомных АДЭУ на основе [13] следующих признаков.

1. Тепловые двигатели (ТД): двигатели с внешним подводом теплоты или двигатели Стирлинга (ДВПТ); дизели по замкнутому циклу (ДЗЦ); паровые турбины замкнутого цикла; газотурбинные установки замкнутого цикла в чистом виде и комбинированные с разнообразными высокометаллизированными топливными элементами (ТЭ).

2. Установки на основе прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, включая конверсию/реформинг углеводородного топлива и гидротермальное окисление металла, с получением водорода, использующегося в электрохимических генераторах (ЭХГ): твердооксидных топливных элементов; полимерного электролита (или протон-обменной мембраны); щелочных ТЭ; реформинга метанола и войсковых сортов углеводородного топлива; фосфорно-кислотных ТЭ; расплавленного карбонатного ТЭ; термохимических реакторов с использованием высоко-металлизированного и топлива на основе термитных смесей.

3. Аккумуляторные батареи (АБ) высокой емкости различных типов и с использованием полупроводниковых термоэлектрических генераторов.

Как уже отмечалось ранее, универсальным окислителем для всех вышеупомянутых основных типов ЭУ принято использовать кислород, что связано с отработанностью технологических решений по его получению, хранению и использованию. А применяемое для АДЭУ топливо должно обладать высокой теплотворной способностью, нетоксичностью, взрывопожаробезопасностью, низкой стоимостью, простотой доставки и хранения в местах базирования, незаметностью и простотой удаления продуктов сгорания.

Кратко оценим состояние дел по вышеописанным ЭУ.

В целом, ТД функционируют за счет преобразования теплоты, получаемой при сжигании твердых, жидких, газообразных топлив в работу. Процесс может происходить как вне ТД, так и в его рабочем пространстве, что дало названия двигателям внешнего и внутреннего сгорания.

Все современные ТД имеют довольно низкий КПД, что обусловлено неполным применением тепловой энергии при преобразовании ее в механическую.

Существующие применяемые методы повышения КПД, как правило, направлены на развитие рабочего цикла двигателя и теоретически не превышают 55% [14].

Лучшим КПД на данный момент обладают ДВПТ внешнего сгорания, функционирующие по циклу Стирлинга [15]. Основой такой тепловой машины является поршневой двигатель, имеющий газообразное рабочее тело функционирующий при замкнутом термодинамическом цикле. Циклические процессы сжатия и расширения в нем происходят при различном уровне температур.

Преимуществом ДВПТ [15] можно считать: высокий КПД двигателя; высокую мощность; неприхотливость к различным сортам и типам углеводородного топлива; бесшумность в работе и отсутствие вибраций; низкую токсичность продуктов сгорания; высокое давление продуктов сгорания. Положительным качеством также является то, что его применяют в подводном положении ПЛ для вращения рабочего привода и подзарядки АБ.

К недостаткам можно отнести: дороговизну материалов, сложность конструкции и изготовления.

Основными разработчиками ДВПТ в мире являются нижеследующие фирмы: United Stirling AB und Co (Швеция); N.V. Philips Co (Нидерланды); MAN-MWM (Германия); Ford Motor Co, General Motors Corp., Mechanical Technology Incorp., Solar Energy Research Institute, University of Winsconsin (США); University of Tokyo, Mitsubishi Electric Corp. (Япония); Ricardo (Великобритания) [16].

После распада СССР в России серьезных исследований в данном направлении не проводилось, наша страна не имеет реального разработчика и потенциального производителя ДВПТ необходимой мощности.

Технологическим преимуществом *дизелей по замкнутому циклу* (ДЗЦ) является применение имеющихся дизельных технологий, что значительно влияет на удешевление его стоимости и упрощает подготовку кадров.

К существенным недостаткам можно отнести его шумность. ЭУ на основе ДЗЦ могут иметь различные конструкции, но при одинаковом принципе действия: из выхлопных газов удаляется CO_2 причем в разных конструкциях это может происходить с применением разных технологических решений, полученная газовая смесь насыщается кислородом и попадает в цилиндры [13].

Основными разработчиками в области работок и производства ДЗЦ являются следующие компании: Thyssen Nordsee Werke TNSW, Motoren and Turbinen Union MTU (Германия); Carlton Deep Sea System CDSS, GEC Marine (Be-

ликобритания); Rotterdamshe Droogdok Maatschappij RDM (Нидерланды); COSMOS (Италия) [17].

В России работы в этой области активно проводятся в ОАО «СПМБМ «Малахит», который совместно с Военным инженерно-техническим университетом разработал и создал ДЗЦ мощностью 10 и 100 кВт с удалением отработанных газов в атмосферу [6].

Одними из наиболее простых в исполнении и применении являются ЭУ на основе паротурбинных установок (ПТУ).

К их преимуществам можно отнести: высокую агрегатную мощность, с работой на рабочую ось; возможность использования газового и жидкого топлив; нечувствительность к качеству топлив.

К недостаткам: присутствие трубопроводов высокого давления, образование газовых взрывоопасных смесей [16, 18].

Крупнейшим производителем ПТУ ЗЦ для ПЛ является Франция, где внедренной ЭУ MESMA (Moduled'EnergieSousMarineAutonome) мощностью 200 кВт комплектуются ПЛ проектов Agosta 90В и Scorpene. ЭУ имеет в наличии два тепловых контура, в первом происходит сжигание топлив на основе этилового спирта с окислением кислородом, второй состоит из паровой турбины, приводящей в действие турбогенератор [13].

Аналогичными исследованиями и производством в России АДЭУ с высокотемпературной ПТУ ЗЦ занимаются компании ОАО «СПМБМ Малахит» и ЗАО научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон».

АДЭУ на основе газотурбинных двигателей (ГТД) замкнутого цикла (ЗЦ) являются частным случаем развития технологий дизель-генераторов работающих по ЗЦ как правило на углеводородном горючем и отличаются прежде всего заменой поршневого двигателя газотурбинным в технологической схеме ЭУ.

Функционирование ГТД основано на преобразовании тепловой энергии в механическую работу, при сжигании топлив в условно замкнутом цикле с вращением турбины с помощью рабочих газов имеющих высокую температуру.

К положительным свойствам ГТД по ЗЦ можно отнести: сравнительно небольшие вибрационные характеристики, возможность создания низкой шумности (устранение шумности), возможность регулирования мощности давлением рабочего тела, компактность оборудования, сравнительно высокий КПД, надежность, отсутствие необходимости использования воды в тех-

нических процессах, возможность использования при низких температурах, высокая отработка технологических решений. К отрицательным: шумность (если не заниматься ее устранением), наличие вращающегося электрогенератора [19].

В сравнении с АДЭУ на базе ЭХГ с реформингом метанола и войсковых сортов углеводородного топлива ГТД ЗЦ выгодно отличается: отсутствием сложной взрыво- и пожароопасной системы с водородом и особенностями, связанными с его генерацией и обращением; освоенностью мощностей в широком диапазоне; меньшей стоимостью изделия и жизненного цикла, при равной стоимости разработок создания ЭУ одной мощности; отсутствием зарубежных аналогов.

Реализованы различные схемы ЭУ на основе ГТД, например: замкнутой ГТУ, работающей на органическом топливе; замкнутой ГТУ с регенерацией теплоты; замкнутой ГТУ с турбиной перерасширения.

Технологии создания ГТД хорошо освоены Российской промышленностью и является наиболее развитой отраслью отечественного энергомашиностроения. ОАО «НПО Сатурн» производит ГТД широкого спектра применения диапазоном мощности до 110 МВт, разработаны и созданы ГТД морского применения мощностью 4,5 и 9 МВт (двигатели М75РУ и М70ФРУ соответственно) [20].

Необходимо отметить, что возможны различные комбинации ЭУ основанные на компоновках разных видов ТД имеющих широкий диапазон мощностей и эффективностей в работе [16]. Например, комбинированные ЭУ: дизель-дизельная; дизель-газотурбинная; газотурбинная; газотурбинная-электрическая; котло-газотурбинная; атомно-котлотурбинная; атомно-газотурбинная.

Ведущими производителями ТД судового, транспортного и промышленного назначений в нашей стране являются: ОАО «Барнаультрансмаш», ОАО «Брянский машиностроительный завод», ОАО «Волжский дизель», ОАО «Дагдизель», ПАО «Звезда», ОАО «Коломенский завод», ОАО «Пенздизельмаш», ОАО «РУМО», ООО «Уральский дизель-моторный завод» [16].

В мире, известны такие основные производители: MTU, MAN и B&W (Германия), MaK, Caterpillar, Cummins, GME (США), Pielstick (Франция), Iveco (Италия), Wärtsilä (Финляндия), Sulzer (Швейцария), Mitsubishi, YANMAR и Daihatsu (Япония), Volvo Penta (Швеция), Guascor (Испания), ABC (Бельгия) [16].

С характеристиками основных ТД, производимых в России можно ознакомиться по ссылке [16, 21, 22].

Дизеле- и двигателестроение является приоритетной отраслью в нашей стране, которая за счет своей многопрофильности способствует развитию многих отраслей нашей промышленности включая судостроение и военное кораблестроение. Однако необходимо отметить значительное отставание развития данной отрасли в России по сравнению с развитыми зарубежными странами. Это обусловлено теми негативными политическими и экономическими катаклизмами, которым подверглась наша страна за последние 30 лет, доведя современный уровень вышеописанного производства до показателей 10-50% уровня конца 1980-х гг. [16].

В настоящее время Россия пытается сократить это отставание, о чем собственно свидетельствует принятие Распоряжения Правительства РФ от 21 апреля 2011 г. № 710-р, в котором утверждена Концепция подпрограммы «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» [23].

Перспективным считается область развития энергетических источников, где в качестве основы топлива содержится водород, функционирующих на основе *прямого преобразования химической энергии различных топлив в электрическую*. Эти источники принято называть *топливными элементами* (ТЭ) [24]. Они являются устройствами не только преобразующими энергию топлив в электричество, но и частично в теплоту без вовлечения процессов, возникающих при его сжигания. Рассматривая структуру и принцип действия ТЭ можно представить их в виде гальванической батареи, выполняющей функции прямого перехода энергии возникающей в процессе функционирования ТЭ благодаря химической реакции, преобразованной в электрическую энергию и одновременно ТД, которому необходима постоянная подача топлива. Эти особенности и дали второе название ТЭ — электрохимические генераторы. Как и АБ, ТЭ имеют электролит, химический состав которого практически не изменяется во время его работы и им не нужна перезарядка. Однако ТЭ не похожи на АБ, потому, что срок их эксплуатации ограничен поступлением топлива и его окислителя извне.

Уже сейчас, ТЭ благодаря своей надежности, долговечности, экологичности, эффективности нашли свое использование в: отраслях космической промышленности; автономных источ-

никах тока в энергетике; источниках питания гаджетов; стационарных электростанциях; ЭУ спецтехники [25].

К положительным качествам ЭУ на ТЭ можно отнести: высокий КПД составляющий от 60 до 80%; компактные размеры; бесшумность в работе при получении электроэнергии; отсутствие наличия деталей совершающих механические движения (работу); низкотемпературный процесс генерирования электроэнергии; отсутствие влияния на функциональную работу ЭУ критических глубин нахождения ПА и ПЛ; хорошее и простое управление с контролем процесса; высокая ресурсоспособность и ремонтпригодность; полная экологическая безопасность; отсутствие газовой следности; отсутствие проблем с удалением отработавших продуктов электрохимической реакции; модульность, позволяющая легко менять мощность ЭУ [26].

К недостаткам относятся: высокая стоимость; присутствие водорода с позиций обеспечения взрывоопасности, хранения, эксплуатации; требования к квалификации кадров [24].

Сейчас разработаны и эксплуатируются различные типы и виды ТЭ, широкого круга применения, в зависимости от которого, используются различные материалы для их изготовления (включая электроды и состав электролитов), процесс генерации энергии в различных типах одинаков.

Рассмотрим основы работы ТЭ [24]. Основные химические процессы протекают на электродах имеющих разветвленную структуру, водород, входящий в различные виды топлива подается на анод ТЭ, где его атомы разлагаются, образуя электроны и протоны. Электроны попадают во внешнюю цепь, образуя электрический ток, а протоны, через протонообменную мембрану перемещаются на катод, взаимодействуя с кислородом и электронами из внешней электрической цепи, после чего получается вода. В результате функционирования ТЭ образуются побочные продукты в виде водяного пара и выделяющейся теплоты.

Рассмотрим наиболее известные виды ТЭ [24, 16].

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ). Эти ТЭ имеет одну из самых высоких плотностей мощности. Преимуществом является отработанность технологий и возможностей производства. Недостаток заключается в дороговизне, связанной с относительной сложностью изготовления при наличии дорогих материалов.

Щелочные топливные элементы (ЩТЭ). Используются в качестве ЭУ космического при-

менения. Преимуществом служит использование этанола и его производных в качестве топлива, а недостатки определяются относительно низкими ресурсоспособностью и выходными техническими характеристиками, связанными с наличием CO_2 в топливе и его окислителе.

Фосфорно-кислотные топливные элементы (ФКТЭ). Нашли современное применение в стационарных электростанциях, и в качестве транспортных ЭУ. Недостатки данного вида ТЭ связаны с: дороговизной материалов (использованием электродов изготовленных из графита с содержанием платины); необходимостью проведения реформинга топлива. В мире существует более 200 электростанций основанных на ФКТЭ, крупнейшая из которых имеет мощность 11 МВт.

Расплавной карбонатный топливный элемент (РКТЭ). Нашли применение в газовых и угольных электростанциях двойного назначения. Преимуществом является: широкий диапазон применяемых топлив. К недостатку относится

высокотемпературный процесс генерации и наличие коррозионного электролита, что приводит к низкой ресурсоспособности. К положительным моментам следует отнести недорогие материалы, применяемые для катализаторов, и неподверженность негативным воздействиям CO_2 применяя его в качестве топлива.

Твердоокисные топливные элементы (ТОТЭ). Сегодня — наиболее технически проработанные и применяемые в мире ТЭ. К преимуществам можно отнести: использование недорогих материалов для элементов конструкций, некретичность к использованию топлив, высокий КПД. В качестве топлив используют любое водородосодержащее сырье, от природного газа, нефти и нефтепродуктов до отходов деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяйства.

Сравнительный анализ характеристик рассмотренных выше видов ТЭ представлен в таблице 1 [16, 24].

Таблица 1 Характеристики топливных элементов [16,24]

ТЭ	ТПТЭ	ЩТЭ	ФКТЭ	РКТЭ	ТОТЭ
Рабочая температура, °C	30 — 100	50 — 250	100 — 220	550 — 1000	450 — 1000
Материал анода	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C, Pt-Co/C, Pt Pt-Pd/C	Pt/C, Pt-Ru/C	Ni-Al, Ni-Cr	Ni, NiO
Материал катода	Pt/C	Ni (Pt)	Pt/C, Pt-WO ₃ /C	LiFeO ₂	LaSrMnO ₃
Электролит	Полимерная мембрана	КОН/NaOH на носителе	H ₃ PO ₄ на носителе	LiKCO ₃ , LiNaCO ₃	ZrO ₂ , CeO ₂ , Y ₂ O ₃
Эффективность, %	35 — 50	40 — 65	35 — 40	50 — 70	45 — 70
Диапазон мощности, кВт	0,01÷100	~ 100	~ 100	≥ 1000	≥ 1000
Тип топлив	Чистый водород	Чистый водород	Чистый водород	Углеводородное топливо	Углеводородное топливо
Макс. ресурс, ч	до 2·10 ⁴	до 1·10 ⁴	до 5·10 ⁴	до 2·10 ⁴	до 6·10 ⁴

На рис. 1 показаны основные области применения ТЭ [24].

Основными мировыми компаниями, занимающимися ТЭ являются: General Electric, Mitsubishi, Siemens. В развитых странах существует система государственной поддержки исследований в области разработки и производства ТЭ: SECA в США; Real-SOFC, Flame-SOFC, Large-SOFC и др. в ЕС; NEDO в Японии [27].

В США сформирован кластер Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) занимающийся программами связанными, в частности, с ТЭ. Компания Delphi производит небольшие (2,5 л, 9 кг) ЭУ на основе ТОТЭ, используемые на

транспорте. FuelCellEnergy производит ЭУ для морского применения. Компания Siemens изготавливает огромный ассортимент ЭУ с ТОТЭ в диапазоне мощностей: 5-300 кВт. Исследованиями и производством в области ЭУ на ТОТЭ занимается более сотни крупных мировых компаний.

Ниже приведены разработки на основе ТЭ проводимые в России [24].

В нашей стране основными игроками в области исследования, разработки и изготовления ТЭ является Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, где изготовлены

и испытаны ЭУ на основе ТОТЭ мощностью 1 и 2 кВт с ресурсоспособностью около 8800 часов.

Институт электрофизики уральского отделения РАН с ООО «Центр промышленных нанотехнологий» занимается вопросами разработок и внедрения производств для изготовления энергосберегающих установок, имеющих в своем составе ТОТЭ.

Центральное конструкторское бюро «Рубин» разработало проект ПЛ «Амур-950» с АД-ЭУ на основе ТЭ, превосходящей по основным характеристикам (скрытность, и дальность подводного хода) зарубежных конкурентов, с энергетической мощностью 400 кВт (аналогичные проекты в Германии, Швеции и Франции — 180 кВт).

Центральным научно-исследовательским институтом судовой электротехники и технологии реализован проект изготовления комбинированной ЭУ на основе ТОТЭ включающей турбогенератор и утилизационный теплообменник. А

совместно с Институтом высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ) РАН изготовлена и испытана ЭУ на основе ТОТЭ мощностью 1 кВт. В свою очередь, ИВТЭ совместно с ООО «Завод электрохимических преобразователей» изготовил и испытал ЭУ на основе ТОТЭ мощностью от 100 до 1500 Вт, в нем же, в рамках «Программы мегагрантов», создана лаборатория, в которой занимаются исследованиями ТОТЭ с несущим и тонкослойным протонным электролитом.

Существует ряд крупных программ по созданию новых технологий в области развития ТЭ, в частности поддерживаемых: институтами РАН; целевой программой Фонда поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности «Энергия без границ»; Программой мегагрантов. Изготавливается принципиально новое оборудование для их создания, разрабатываются образовательные программы для подготовки кадров.

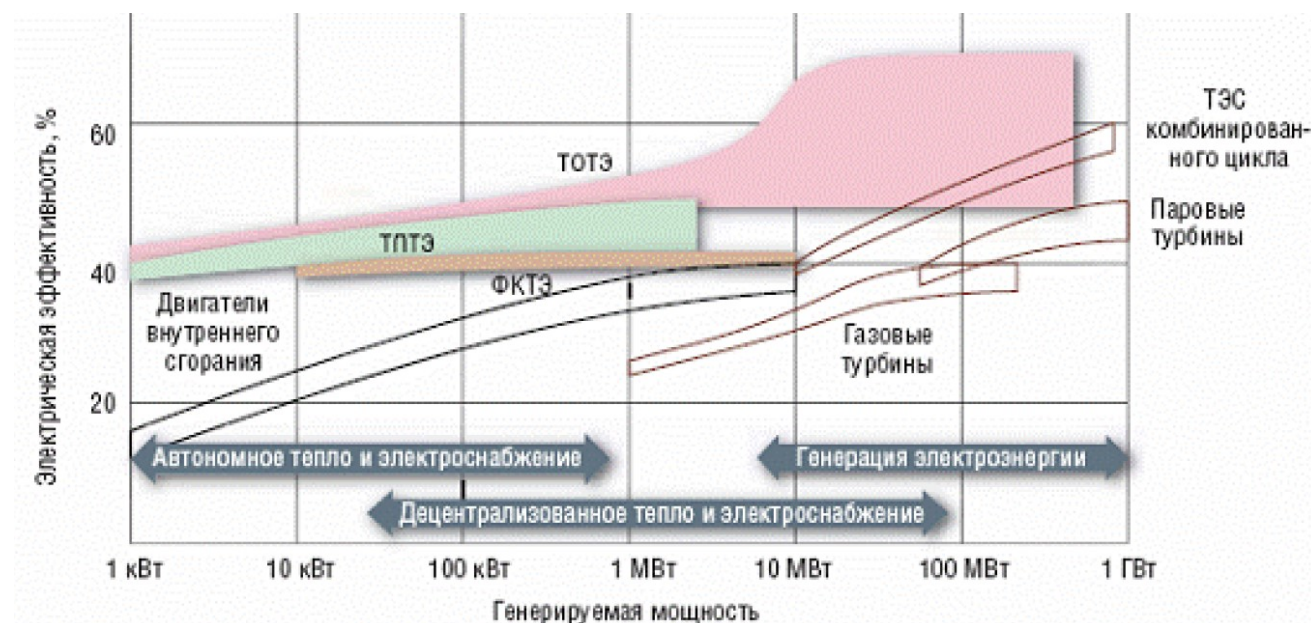


Рис. 1. Применение ТЭ

Отдельно стоит рассмотреть ЭУ, включающие *термохимические реакторы с использованием высокометаллизированного и топлива на основе термитных смесей*, достоинствами которых служит: высокая эффективность используемых топлив; абсолютная взрыво- и пожаробезопасность, облегчающая условия хранения топлив в твердом состоянии; побочные продукты имеют твердое состояние, что упрощает их утилизацию [28]. Производителями используются различные модификации топлив и окислителей. Это может быть, например, алюминий с кисло-

родом или более сложным окислителем на основе окислов хрома и железа, магний с углекислым газом или литий с окислителем на основе окиси хрома или фторида серы. При этом, как топливо, так и окислитель могут находиться и в твердом и в жидком, а иногда даже в газообразном состоянии. Конструкции таких ЭУ могут также сильно отличаться. Используются камеры сгорания разных типов: прямоточные, циклонные, слоевые, барботажные, погружные, осуществляться поверхностное горение. Окисление сопровождается выходом высокотемпературного высококона-

порного потока пароводородной смеси, что позволяет использовать дальнейшее преобразование тепла, комбинируя ЭУ оборудованием на основе ГТУ ЗЦ, ПТУ ЗЦ, двигателями с внешним подводом тепла (Стирлинга), ТЭ и их комбинациями, полупроводниковыми термоэлектрическими генераторами (ТЭГ) [29, 30]. При этом могут применяться одноконтурные и многоконтурные технологические схемы производства энергии.

Альтернативой ТД является комплектование ПЛ ЭУ на основе АБ большой емкости. К преимуществам этих ЭУ можно отнести: абсолютную бесшумность, простоту конструкции, относительную простоту в обслуживании, малую стоимость [13].

К недостаткам можно отнести: малую мощность, ограничивающую скорость хода, повышенные массогабаритные характеристики установки [13].

Такой тип ЭУ относится к более простым. Несмотря на это современные АБ имеют существенный недостаток, заключающийся в относительно малой емкости, недостаточной для обеспечения поставленных перед ПЛ задач при нахождении под водой на необходимое время (порядка двух недель) имея при этом довольно высокое энергетическое потребление (порядка 50 кВт·ч). Применяемая на отечественных ПЛ свинцово-кислотная АБ не удовлетворяет необходимым требованиям. Но с появлением новых технологий разработаны и изготовлены принципиально новые АБ, например как АБ Зебры про-

изводства Роллс-ройса или литий-ионные АБ, которые вполне можно использовать для вышеописанных целей.

Кроме того, модернизируются традиционные и разрабатываются принципиально новые типы АБ, такие как: серно-натриевые, натриево-серебрянные, натрий-никельхлоридные, литиево-хлорные, литиево-серебрянные, литий-полимерные, никель-металгидридные, серебряно-цинковых, никель-кадмиевых, никель-цинковых, натриевых и хлорно-литиевых аккумуляторов и др., которые имеют удельную емкость до 12 раз превышающую активно используемую ныне свинцово-кислотную АБ [31].

В Великобритании, США и Швеции активно ведутся исследовательские работы по разработке и изготовлению железно-литиевых АБ [32], основными требованиями заказчика к которым является: герметичное исполнение с возможностью работы в агрессивных средах; стойкость к экстремальным условиям функционирования (температура, давление); длительный срок службы. В разрабатываемой АБ литий используется в виде сплава с алюминием, в качестве электролита применяется многокомпонентный эвтектический расплав. В Швеции разработаны, испытаны и внедрены литийонил-хлоридные АБ. Перспективными для использования в АДЭУ ПЛ считаются никель-алюминиевые и серебряно-железные АБ. Удельная емкость некоторых современных АБ показана в таблице 2 [32].

Таблица 2. Удельная массовая энергия различных типов АБ [32]

Тип батареи	Удельная емкость, Вт·ч/кг
Свинцово-кислотная	35-40
Никель-кадмиевая	35-38
Серебряно-цинковая	120
Зебра	160
Серно-Натриевые	170
Литий - ионные	110

В перспективе к использованию на ПЛ планируются АДЭУ на основе новых гибридных энергетических систем, объединяющих высокоемкие, маломощные источники тока (например, воздушно-цинковые элементы) и источники тока, способные к разряду большими токами, например, литий-ионные АБ или ионисторы. Используя такие АБ при переменной нагрузке представляется возможным извлечение энергии большей, чем суммарная энергия этих источников с возможностью получения более высокого напряжения.

В России история развития АБ для ПЛ, в основном, связана с батареями свинцово-кислотного типа.

Созданы лодочные АБ, не уступающие лучшим мировым образцам аналогичных типов, но по энергетическим характеристикам (удельной массовой и объемной энергоемкости) данные батареи вплотную подошли к своему теоретическому пределу.

Перспективными для использования на ПЛ в нашей стране признаны литий-ионные АБ. Конструктивно такая АБ представляет собой ленточный углеродсодержащий электрод (анод),

органический электролит, содержащий соли лития, катод — литиевые соединения кобальта (марганца). В РФ производятся аккумуляторы типа ЛИКГП-150С номинальной емкостью 150–170 А·ч [10].

ОАО «Уралэлемент» производит литий-полимерные аккумуляторы ICGP-11/215 с номинальной емкостью $C_n = 35$ А·ч и номинальном напряжении $U_n = 3,6$ В при массе $m = 0,8$ кг, к основным преимуществам которых можно отнести: длительный срок службы; низкий самозаряд; большое количество циклов «заряда-разряда» (до 1000 циклов); высокое номинальное напряжение [33]. Необходимо отметить, что на основе данных АБ ОАО «Концерн «Морское подводное оружие — Гидроприбор» разрабатывает и изготавливает силовые ЭУ подводных аппаратов обеспечивающие электроэнергией двигатель-двигательный комплекс и внутриотсечную аппаратуру, в первую очередь гидроакустическую и навигационную.

Несмотря на имеющиеся преимущества вышеописанной батареи, ее заряда недостаточно для выполнения задач, поставленных перед подводным аппаратом при использовании его по прямому назначению. При этом наращивание числа АК с целью увеличения рабочего времени устройства не решает проблемы в связи с нехваткой необходимого пространства на борту аппарата и невозможностью значительного увеличения его рабочей массы.

Кроме того, необходимо учитывать критические условия эксплуатации аппаратов в условиях низких температур, уменьшающих ресурс работы литий-полимерных аккумуляторов.

Альтернативой в таких случаях является использование на борту ПА совместно с АБ термоэлектрических генераторов энергии, преобразующих тепловую энергию в электрическую и использующих для получения теплового потока радиоизотопный элемент. Такие ЭУ называют радиоизотопными термоэлектрическими генераторами (РИТЭГ) [34]. Обычно в качестве радиоизотопов используют стронций-90 или плутоний-238. Такая ЭУ компактна, проста в исполнении и использовании.

Защита от радиоактивного воздействия изготовлена таким образом, что на поверхности РИТЭГ доза не превышает 200 мР/ч, а на расстоянии 1 м — 10 мР/ч [35].

К основным положительным качествам ЭУ на основе РИТЭГ можно отнести: высокую удельную электрическую ёмкость (до 40000 Вт·ч/кг); срок непрерывной генерации более 20 лет; отсутствия акустических и электро-

магнитных шумов; отсутствие движущихся деталей. И, как следствие всего отмеченного, высокая скрытность подводного аппарата совмещенная с надежностью и долговечностью ЭУ.

Использование РИТЭГ в экстремальных условиях состоялось в 1961 году на космических аппаратах. Наиболее известным примером является их применение на зонде «Вояджер-1», который был запущен в космос в 1977 г. и по сей день находится в работоспособном состоянии, выполняя исследование границ нашей Солнечной системы.

Использование полупроводниковых ТЭГ в АДЭУ имеет довольно давнюю историю. С 70-х годов прошлого столетия ими комплектуются атомные ПЛ различных проектов с целью утилизации бросового тепла для использования полученной электрической энергии в нештатных ситуациях для обеспечения работы приборов способствующих поддержанию живучести ПЛ. Такие ТЭГ разделяются на три типа (низкотемпературные, средние и высокотемпературные) и могут осуществлять подбор (переработку) бросового тепла в электроэнергию в диапазоне температур от 20 до 600°C [36, 37]. Достоинством таких приборов является большой срок службы (не менее 20 лет), бесшумность в генерации энергии, модульность, позволяющая легко менять мощность ЭУ. Недостатки заключаются в: сравнительно большой дороговизне и небольшой эффективности. Однако в последнее время ведутся активные работы по ее повышению с применением новых современных наноструктурных материалов [38].

Как уже упоминалось выше, задача создания АДЭУ в различных странах мира решают разными путями, определяя приоритетные направления, в зависимости от уровня развития соответствующей отрасли местного энергомашиностроения.

При выборе вида, разработке и создании АДЭУ необходимо руководствоваться следующими требованиями и соображениями [20], необходимо:

- иметь в наличии импортозамещающих технологий при разработке и внедрении технических решений в процессе создания высокоэффективных, конкурентоспособных, отечественных двигателей Стирлинга и ЭХГ на основе новых современных материалов и видов топлив;
- минимизировать временные и финансовые затраты на ее создание, с наличием низкого уровня технического риска, исключаяющего

- или сводящего к нулю время ее доработки при испытаниях;
- предусмотреть возможности внедрения ЭУ в существующие структурные и энергетические схемы объектов с различными тактико-эксплуатационными характеристиками, необходимостью минимальных доработок и максимальной универсальностью учитывая концепцию двойного назначения;
- обеспечить заданные для функционирования ЭУ эксплуатационные требования, к которым могут относиться: вопросы надежности и ремонтпригодности, безопасности и живучести, сложности модернизации обслуживающей инфраструктуры и технической поддержки;

- обеспечить наличием высоких технико-экономических характеристик: экономичное использование топлив, обеспечение необходимых вибрационно-шумовых акустических характеристик, отсутствие тепловой и газовой следности, достойное время ввода и эксплуатации, многорежимность и управляемость, стойкость к воздействиям критических факторов и т. д.

Учитывая вышеописанные требования и соображения, в качестве системы критериев выбора АДЭУ авторами работы [39] предложено использовать методику частных критериев выбора, структура которых представлена на рис. 2.

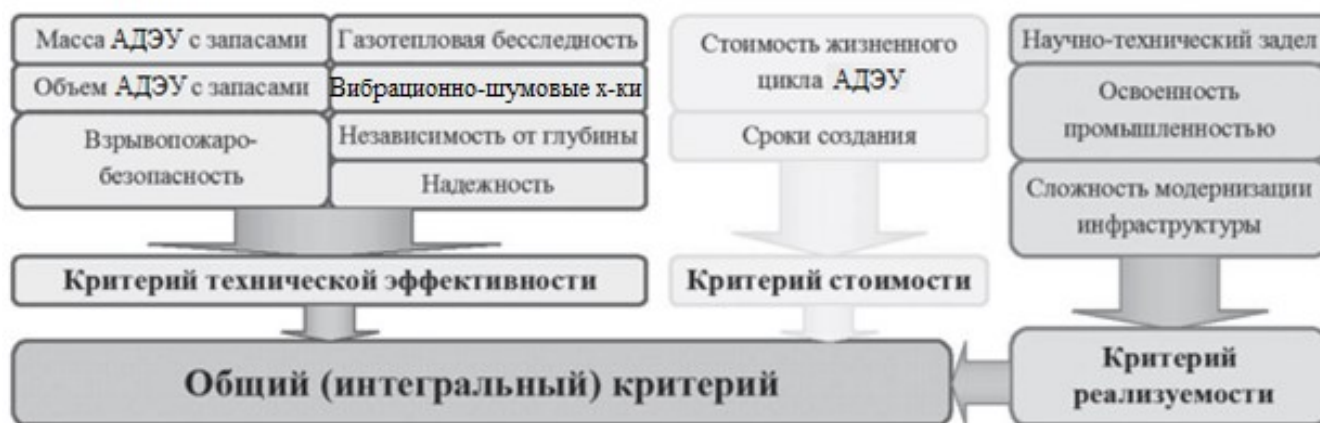


Рис. 2. Структура критериев выбора АДЭУ [39]

Заключение

В результате проведенного обзора можно сделать следующие выводы.

В настоящий момент времени основные типы АДЭУ находятся на этапе своего развития, поэтому выбирать и сравнивать их характеристики, определяя наиболее или наименее эффективные ЭУ для использования в неопределенных целях, не предоставляется возможным.

При выборе АДЭУ необходимо четкое понимание целей, задач, требований к технико-экономическим и эксплуатационным характеристикам дальнейшего применения объекта на котором такая ЭУ будет установлена.

Перспективным является создание «единой» АДЭУ с максимально возможной эффективностью при абсолютном использовании широкого типа топлив и побочных продуктов их реакций, стремящихся к безотходности. Такая «единая» АДЭУ может являться комбиниро-

ванной ЭУ включающей в себя все типы выше-рассмотренных АДЭУ.

Список литературы

1. Широков И.Б. Методы определения водосодержания в нефти и нефтепродуктах, остаточного содержания нефтепродуктов в воде / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии. — 2017. — Т.3. — № 4. — С.130-145.
2. «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, — обращение 15.03.2019
3. «Перечень критических технологий Российской Федерации» от 07 июля 2011 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kremlin.ru/supplement/988>, — обращение 15.03.2019
4. «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в российской федерации» от 07 июля 2011 г. [электронный ресурс]. —

- режим доступа: <http://kremlin.ru/supplement/987>, — обращение 15.03.2019
5. Государственная программа «социально-экономическое развитие арктической зоны российской федерации на период до 2020 года» утверждена постановлением правительства от 21 апреля 2014 года №366. [электронный ресурс]. — режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/ggu3gttv8bvv8gzxseas1r7xmzlok6ar.pdf>, — обращение 15.03.2019
 6. Дядик А.Н. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки / А.Н. Дядик, В.В. Замуков, В.А. Дядик // СПб.: Судостроение. — 2006. — 424 с.
 7. Романова Е.А. Оценка экспортного потенциала неатомных подводных лодок / Е.А. Романова, А.Д. Романов, Е.А. Чернышов // Вооружение и экономика. — 2015. — №1 (30). — С. 100–106.
 8. Сидоренков Д.В. Перспективы создания воздухонезависимой энергоустановки для неатомных подводных лодок России / В.В. Замуков, Д.В. Сидоренков // Изобретательство. — 2014. — № 10. — С. 23–30.
 9. Чернышов Е.А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е.А. Чернышов, Е.А. Романова, А.Д. Романов // Вестник ГУМРФ им. Адмирала С.О. Макарова. — 2015 — Т.5 (33). — С. 140–152.
 10. Денисова М. Ш. Оценка перспективности использования ЭУ с ЭХГ с различными системами хранения топлива и окислителя / М.Ш. Денисова, Р.А. Иванов, Ю.В. Копытов // Силовые энергетические установки. Труды Крыловского государственного научного центра. — 2015. — Т. 3(373). — С. 71–76.
 11. Чернышов Е.А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е.А. Чернышов, Е.А. Романова, А.Д. Романов // Вестник ТОГУ. Машиностроение. — 2015. — Т 4(39). — С. 89–98.
 12. Романов А.Д. Развитие концепции «единого топлива» в странах НАТО / А.Д. Романов, И.Д. Романов, Е.А. Чернышов, Е.А. Романова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2014. — № 9. — С. 34–37.
 13. Чернышов Е.А. Сравнительный обзор и оценка эффективности воздухонезависимых энергетических установок различных конструкций / А.Д. Романов, Е.А. Чернышов, Е.А. Романова // Научное обозрение. Технические науки. — 2014. — № 2 — С. 132–141.
 14. Васильев В.А. История развития подводных лодок с воздухонезависимыми энергоустановками в России и СССР / В.А. Васильев, Е.А. Чернышов, И.Д. Романов, Е.А. Романова, А.Д. Романов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — 2012. — № 4. — С. 192–202.
 15. Савченко В. А. Повышение эффективности двигателя Стирлинга путем совершенствования элементов конструкции внутреннего контура: дис. канд. техн. наук / Савченко Владислав Александрович. — Санкт-Петербург, 2015. — 262 с.
 16. Никитин В.С. Современное состояние и перспективы развития отечественных корабельных дизельных энергетических установок / В.С. Никитин, В.Н. Половинкин, В.В. Барановский // Силовые энергетические установки. Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — Т.2(380). — С. 70–91.
 17. Kopp C. Air Independent Propulsion – now a necessity / Kopp C. // Defence Today. – 2010. — №12 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ausairpower.net/SP/DT-AIP-SSK-Dec-2010.pdf>. — обращение 15.03.2019.
 18. Батенин В. М. Парогазовая энергетическая установка для комбинированной выработки электрической энергии, теплоты и холода (тригенерация) / В. М. Батенин, В. М. Масленников, Ю. А. Выскубенко, Э. А. Цалко, В. Я. Штеренберг // Теплофизика высоких температур. — 2014. — Т. 52. — № 6. — С. 934–940.
 19. Матвеев В.Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный, А.В. Дологлонян // Вестник ГУМРФ им. Адмирала С.О. Макарова. — 2017— Т.8. — №3. — С. 612–618.
 20. Замуков В.В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков Д. В. Сидоренков // Судостроение. Военное кораблестроение. — 2012. — №4. — С. 29–33.
 21. Каргин С.А. Проблемы повышения энергетической эффективности транспортных энергетических установок / С.А. Каргин // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. — 2011. — №2. — С.84–90.
 22. Боровикова И. А. Оценка технического уровня качества судового двигателя / И. А. Боровикова // Вестник ГУМРФ им. Адмирала С.О. Макарова. — 2015. — Т.4. — С. 138–146.
 23. «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» Распоряжения Правительства РФ от 21 апреля 2011 г. № 710-р [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55071193/>, — обращение 15.03.2019.
 24. «Твердоокисные топливные элементы: проблемы, пути решения, перспективы развития и коммерциализации. Аналитический обзор.» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_8.pdf, — обращение 15.03.2019.

25. Красильников А.В. Технологии испытаний систем рециркуляции реагентов батарей топливных элементов для морских роботизированных средств / А.В. Красильников, Д.Н. Шаманов, Р.В. Красильников, И.В. Шаманова // ФГБОУ «СПбМТУ», Санкт-Петербург. — 2014. — 124 с.
26. Аваков В.Б. Межвидовый подход к разработке и внедрению энергоустановок на топливных элементах / В.Б. Аваков, М.А. Загородников, Д.А. Хайров, И.К. Ландграф, М.А. Касаткин // Силовые энергетические установки. Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — Т.4(378). — С. 149-162.
27. Романова Е.А. История развития зарубежных энергетических установок для подводных объектов на основе топливных элементов / Е.А. Романова, А.Д. Романов // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. — 2015. — №1. — С. 84-90.
28. Чернышов Е.А. Высокометаллизированное топливо на основе алюминия и его применение / Е.А. Чернышов, А.Д. Романов // Технические науки – от теории к практике. — 2013. — № 24. — С. 69-73.
29. Чернышов Е.А. Разработка тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива / Е.А. Чернышов, А.Д. Романов, Е.А. Романова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. — 2015. — №6. — С. 74-81.
30. Жук А.З. Производство энергии на базе низкотемпературных алюмоводородных технологий / А.З. Жук, Е.И. Школьников, В.И. Мирошников, П.П. Иванов, М.С. Власкин, Е.А. Бузоверов // Известия академии наук. Энергетика. — 2011. — №5. — С. 26-37.
31. Кулова Т.Л. Современные электрохимические системы аккумуляции энергии / Т.Л. Кулова, И.И. Николаев, В.Н. Фатеев, А.Щ. Алиев // Химические проблемы. — 2018. — №1. — С.9-34.
32. Никифоров Б.В. Литий-ионные аккумуляторные батареи в качестве основных источников электроэнергии дизель-электрических подводных лодок / Б.В. Никифоров А.В. Чигарев, К.С. Ляпидов, А.М. Кулабухов, Е.Н. Власов // Судостроение. — 2010. — №2. — С. 25-28.
33. Мартынов В.Л. Силовая установка повышенной эффективности для автономных необитаемых подводных аппаратов / В.Л. Мартынов, Ю.В. Никитина, А.С. Голосной // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму – М.: НТЦ «Инфоритехника». — 2016. — Вып. 7-8. — С. 124-130.
34. Баукин В.Е. Высокоэффективные системы энергообеспечения автономных необитаемых подводных аппаратов на базе радиоизотопных термоэлектродвигателей / В.Е. Баукин // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Домбай, Карачаево-Черкесская республика, 2015. — 12 с.
35. Чернецов П.О. Системы электроснабжения подводных аппаратов автономностью свыше десяти лет / П.Г. Шостаковский, П.О. Чернецов // Технические проблемы освоения мирового океана. — 2015. — Т.6. — С. 93-96.
36. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические генераторы промышленного применения. Часть 2 / П.Г. Шостаковский // Современная электроника. — 2016. — №1. — С. 2-5.
37. Шостаковский П.Г. Альтернативные источники электрической энергии промышленного применения на основе термоэлектрических генераторов / П.Г. Шостаковский // Control Engineering Russia. — 2013. — №3 (45). — С. 52-56.
38. Освенский В.Б. О возможности сохранения наноструктурного состояния при получении объемного термоэлектрического материала на основе халькогенидов висмута и сурьмы / В.Т.Бублик, Л.П.Булат, В.В.Каратаев, И.И. Марончук, В.Б.Освенский и др. // Известия ВУЗов. Физика. — 2010. — Т.50. — № 3/2. — С. 37-41.
39. Замуков В.В. Состояние и перспективы развития воздухонезависимых энергоустановок подводных лодок / В.В. Замуков, С.А. Петров, Д.В. Сидоренков // Судостроение. — 2007. — № 5. — С. 39-43.

References

1. Shirokov I.B. Methods for determining water content in oil and oil products, residual content of oil products in water / I.I. Maronchuk, I.B. Shirokov // Power plants and technologies. — 2017. — Vol.3. — № 4. — P.130-145.
2. «Energy Strategy of Russia for the Period until 2030» Approved by Order of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009 No. 1715— p [Electronic resource]. — Access mode: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, — appeal 03/15/2019
3. «The list of critical technologies of the Russian Federation» dated July 07, 2011 [Electronic resource]. — Access mode: <http://kremlin.ru/supplement/988>, — appeal 03/15/2019
4. «Priority directions of development of science, technology and technology in the Russian Federation» dated July 07, 2011 [Electronic resource]. — Access mode: <http://kremlin.ru/supplement/987>, — appeal 03/15/2019
5. The state program «Social and economic development of the Arctic zone of the Russian Federation for the period up to 2020» was approved by the Government of April 21, 2014 No. 366. [Electronic resource]. — Access mode: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTtv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf>, — appeal 03/15/2019

6. Uncle A.N. Shipborne air— independent power plants / A.N. Dyadik, V.V. Zamukov, V.A. Uncle // SPb.: Shipbuilding. — 2006. — 424 p.
7. Romanova E.A. Evaluation of the export potential of non— nuclear submarines / Ye.A. Romanova, A.D. Romanov, E.A. Chernyshov // Armament and economy. — 2015. — №1 (30). — P. 100–106.
8. Sidorenkov D.V. Prospects for the creation of an air— independent power plant for non— nuclear submarines of Russia / V.V. Zamukov, D.V. Sidorenkov // Invention. — 2014. — № 10. — P. 23–30.
9. Chernyshov E.A. The development of air— independent power plants of submarines / E.A. Chernyshov, E.A. Romanov, A.D. Romanov // Bulletin of the GUMRF them. Admiral S.O. Makarova. — 2015 — T.5 (33). — P. 140–152.
10. Denisov M. Sh. Evaluation of the prospects of using EC with ECG with various fuel and oxidizer storage systems / M.Sh. Denisova, R.A. Ivanov, Yu.V. Kopytov // Power plants. Proceedings of the Krylov State Research Center. — 2015. — T. 3 (373). — P. 71–76.
11. Chernyshov E.A. The development of air— independent power plants of submarines / E.A. Chernyshov, E.A. Romanov, A.D. Romanov // Bulletin of TOGU. Engineering. — 2015. — T 4 (39). — P. 89–98.
12. Romanov A.D. The development of the concept of «single fuel» in the NATO countries / A.D. Romanov, I.D. Romanov, E.A. Chernyshov, E.A. Romanova // International Journal of Applied and Basic Research. — 2014. — № 9. — P. 34–37.
13. Chernyshov E.A. Comparative review and assessment of the efficiency of air— independent power plants of various designs / A.D. Romanov, E.A. Chernyshov, E.A. Romanov // Scientific Review. Technical science. — 2014. — № 2 — P. 132–141.
14. Vasiliev V.A. The history of the development of submarines with air— independent power plants in Russia and the USSR / V.A. Vasiliev, E.A. Chernyshov, I.D. Romanov, E.A. Romanov, A.D. Romanov // Proceedings of the NSTU. R.E. Alekseeva. — 2012. — № 4. — P. 192–202.
15. Savchenko, VA, Increasing the Efficiency of a Stirling Engine by Improving the Elements of the Construction of the Internal Contour: Dis. Cand. tech. Sciences / Savchenko Vladislav Alexandrovich. — St. Petersburg, 2015. — 262 p.
16. Nikitin V.S. The current state and prospects of development of domestic ship diesel power plants / V.S. Nikitin, V.N. Polovinkin, V.V. Baranovsky // Power plants. Proceedings of the Krylov State Research Center. — 2017. — Vol. 2 (380). — P. 70–91.
17. Kopp C. Air Independent Propulsion — now a necessity / Kopp C. // Defense Today. — 2010. — №12 [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.ausairpower.net/SP/DT—AIP—SSK—Dec—2010.pdf>. — appeal 03/15/2019.
18. Batenin V. M. Steam— gas power plant for combined generation of electric energy, heat and cold (trigeneration) / V. M. Batenin, V. M. Maslennikov, Yu. A. Vyskubenko, E. A. Tsalko, V. Ya. Shterenberg // High Temperature Thermophysics. — 2014. — V. 52. — № 6. — P. 934–940.
19. Matveyenko V.T. Characteristics of the working processes of air— independent single— circuit microgas turbine installations for underwater technology / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyany, A.V. Dologlonyan // Bulletin of the GUMRF them. Admiral S.O. Makarova. — 2017— T.8. — Number 3. — P. 612–618.
20. Zamukov V.V. The choice of an air— independent power installation of non— nuclear submarines / V. V. Zamukov D. V. Sidorenkov // Shipbuilding. Military karableostroenie. — 2012. — №4. — P. 29–33.
21. Kargin S.A. Problems of increasing the energy efficiency of transport power plants / S.A. Kargin // ASTU Bulletin. Marine technology and technology. — 2011. — №2. — P.84–90.
22. Borovikova I. A. Evaluation of the technical quality level of a ship engine / I. A. Borovikova // Vestnik GUMRF im. Admiral S.O. Makarova. — 2015. — T.4. — P. 138–146.
23. «Creation and organization of production in the Russian Federation in 2011–2015 of diesel engines and their components of a new generation» Order of the Government of the Russian Federation of April 21, 2011 No. 710— p [Electronic resource]. — Access mode:<http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55071193/>, — circulation 03/15/2019 .
24. «Solid oxide fuel cells: problems, solutions, prospects for development and commercialization. Analytical review». [Electronic resource]. — Access mode: https://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_8.pdf, — appeal 03/15/2019.
25. Krasilnikov A.V. Test Technologies for the Recycling of Fuel Cell Reagents for Marine Robotized Means / A.V. Krasilnikov, D.N. Shamanov, R.V. Krasilnikov, I.V. Shamanov // FSBIU «SPbMTU», St. Petersburg. — 2014. — 124 p.
26. Avakov V.B. Interspecific approach to the development and implementation of fuel cell power plants / VB Avakov, M.A. Zagorodnikov, D.A. Khairov, I.K. Landgraf, MA Kasatkin // Power plants. Proceedings of the Krylov State Research Center. — 2017. — Vol. 4 (378). — P. 149–162.
27. Romanova E.A. The history of the development of foreign power plants for underwater objects based on fuel cells / E.A. Romanov, A.D. Romanov // ASTU Bulletin. Marine technology and technology. — 2015. — №1. — P. 84–90.
28. Chernyshov E.A. Highly metallized fuel based on aluminum and its application / Ye.A. Chernyshov, A.D. Romanov // Technical Sciences — from theory to practice. — 2013. — № 24. — P. 69–73.

29. Chernyshov E.A. Development of a fuel element based on highly metalized gasless fuel / Ye.A. Chernyshov, A.D. Romanov, E.A. Romanov // Bulletin of Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Mashinostroenie.— 2015. — №6. — P. 74-81.
30. Zhuk, A.Z. Energy production based on low—temperature alumina— hydrogen technologies / A.Z. Zhuk, E.I. Shkolnikov, V.I. Miroshnichenko, P.P. Ivanov, M.S. Vlaskin, E.A. Buzoverov // News of the Academy of Sciences. Energy. — 2011. — №5. — P. 26-37.
31. Kulova T.L. Modern electrochemical energy storage systems / TL. Kulova, I.I. Nikolaev, V.N. Fateev, A.SH. Aliyev // Chemical problems. — 2018. — №1. — P.9-34.
32. Nikiforov B.V. Lithium— ion batteries as the main sources of electricity for diesel— electric submarines / B.V. Nikiforov A.V. Chigarev, K.S. Lyapidov, A.M. Kulabuhov, E.N. Vlasov // Shipbuilding. — 2010. — №2. — P. 25-28.
33. Martynov V.L. Power plant of increased efficiency for autonomous uninhabited underwater vehicles / V.L. Martynov, Yu.V. Nikitin, A.S. Voice // Questions of defense technology. Technical means of countering terrorism — M.: NTC «Infortehnika». — 2016. — Vol. 7— 8. — P. 124-130.
34. Baukin V.E. Highly efficient power supply systems for autonomous uninhabited underwater vehicles based on radioisotope thermoelectric generators / V.E. Baukin // Proceedings of the X All— Russian Scientific and Practical Conference «Perspective Systems and Control Problems». Dombay, Karachay— Cherkess Republic, 2015. — 12 p.
35. Chernetsov P.O. Power supply systems for underwater vehicles with autonomy over ten years / PG. Shostakovsky, P.O. Chernetsov // Technical Problems of the Development of the World Ocean. — 2015. — T.6. — P. 93-96.
36. Shostakovsky P.G. Thermoelectric generators for industrial use. Part 2 / PG Shostakovsky // Modern electronics. — 2016. — №1. — P. 2–5.
37. Shostakovsky PG Alternative sources of electrical energy for industrial applications based on thermoelectric generators / PG. Shostakovsky // Control Engineering Russia. — 2013. — №3 (45). — P. 52–56.
38. Osvensky V.B. On the possibility of preserving the nanostructured state in obtaining a bulk thermoelectric material based on bismuth and antimony chalcogenides / V.T. Bublik, L.P. Bulat, V.V.Karataev, I.I. Maronchuk, VB Osvensky and others // News of universities. Physics. — 2010. — T.50. — № 3/2. — P. 37-41.
39. Zamukov V.V. The state and prospects for the development of air— independent power plants of submarines / V.V. Zamukov, S.A. Petrov, D.V. Sidorenkov // Shipbuilding. — 2007.— № 5. — P. 39-43.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.548

Развитие ветроэнергетики в России и Крыму

Е.В. Гусева¹, А.Ю. Шалимов², А.Ю. Богомолов³, А.В. Михненко⁴, А.В. Дыгаль⁵

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская 33, г. Севастополь, Россия, 299053:

¹eleash@mail.ru, ²shalimov@sevsu.ru, ³bogomolov@sevsu.ru, ⁴mikhnenko@sevsu.ru, ⁵dygalv@sevsu.ru

Статья поступила 06.05.2019 г.; после доработки 08.05.2019 г.

Аннотация

В статье рассматривается развитие ветроэнергетики в мире, приводятся количественные показатели, характеризующие современное состояние. Сравнивается состояние российской и мировой ветроэнергетики. Анализируются причины отставания России, а также перспективы ветроэнергетической отрасли в Крыму.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, развитие ветроэнергетики, ветроэнергетика Крыма.

Development of the wind power engineering in Russia and Crimea

Ye.V. Guseva¹, A.YU. Shalimov², A.YU. Bogomolov³, A.V. Mikhnenko⁴, A.V. Dygal⁵Sevastopol State University Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, Russia, 299053. ¹eleash@mail.ru, ²shalimov@sevsu.ru,³bogomolov@sevsu.ru, ⁴mikhnenko@sevsu.ru, ⁵dygalv@sevsu.ru

Received 06.05.2019 г.; received in final form 08.05.2019 г.

Abstract

The article discusses the development of wind power in the world, provides quantitative indicators characterizing the current state. The state of the Russian and global wind power is compared. Analyzed the reasons for the backlog of Russia, as well as prospects for the wind energy industry in the Crimea.

Key words: renewable energy sources, wind power, wind power development, Crimea wind power.

Введение

За последние годы ветроэнергетика стала по-настоящему бурно развивающейся отраслью современной «чистой» или «зеленой» энергетики. Средства преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую, тепловую, и электрическую формы энергии занимают все большую долю в энергетической мировой отрасли.

Запасы этой энергии неисчерпаемы, поскольку ветер возникает в результате действия солнца, а уровень вредных выбросов при такой

генерации практически нулевой. Объемы же выбросов в атмосферу вредных веществ и парниковых газов при сжигании традиционного топлива способствуют изменению климата и негативно сказываются на здоровье человека. Таким образом, очевидна тенденция к успешному, и все большему освоению возобновляемых источников «чистой» энергии.

На данный момент большая часть мощностей, генерируемых ветроэлектрическими установками (38,8%), приходится на страны Европы, 34,5% приходится на страны Азии, доля Северной Америки составляет 23,9%.

Значительно меньшая часть ветроэнергетики приходится на страны Латинской Америки и Карибского бассейна (всего 1,2%). В странах Тихоокеанского региона этот показатель находится на уровне 1,1%, а в странах Африки и Ближневосточного региона - 0,4%.

Большая часть мирового объема установленных мощностей ВЭУ приходится на пять стран: США, Китай, Германию, Индию, и Испанию, на них приходится 73,6%.

Если не брать в расчет гидроэнергетику, то на данный момент ветроэнергетика является самой развитой отраслью возобновляемой энергетики в мире [1].

По итогам 2017 г по общей мощности ветроэнергетики в мире лидируют Китай (188,2 ГВт, 35%), США (89 ГВт, 17%) и Германии (56,1 ГВт, 10%). Доля первых десяти стран рейтинга в мировом ветроэнергетическом балансе составляет 85%.

Все возрастающая зависимость многих стран мира от импорта энергоресурсов, наряду с политической нестабильностью и частыми вооруженными конфликтами в странах – экспортерах, создает риски для энергетической безопасности стран-импортеров.

Это побуждает их правительства задумываться о скорейшем развитии и использовании альтернативных источников энергии.

По данным Global Wind Energy Council, суммарная установленная мощность ветроэлектрических установок (ВЭУ) к началу 2015 года уже составила 369 ГВт.

По данным BP Statistical Review of World Energy 2013, выработка электроэнергии на ВЭУ в мире составляет 521,3 миллиардов киловатт-часов, что соответствует 2,3% от общемирового объема производства электроэнергии.

Мировая ветроэнергетика характеризуется тем, что сокращаются производственные издержки, а значит, повышается конкурентоспособность ветряной технологии.

Так, одними из самых низких показателей себестоимости производства электроэнергии среди альтернативных видов генерации характеризуются береговые ВЭУ, где основная часть капитальных издержек приходится лишь на изготовление, транспортировку и монтаж ВЭУ.

Ежегодное увеличение мощности ветроэнергетики в мире достигло 20%.

Приращение энергии ветра произошло в объемах, как показано на рис. 1.

Россия по имеющемуся потенциалу развития ветроэнергетики занимает первое место в мире (рис. 2).

Но, на сегодняшний день, несмотря на наличие значительных ресурсов ветровой энергии, в России имеет место существенное отставание от мирового уровня.



Рис. 1. Приращение энергии ветра в мире по годам

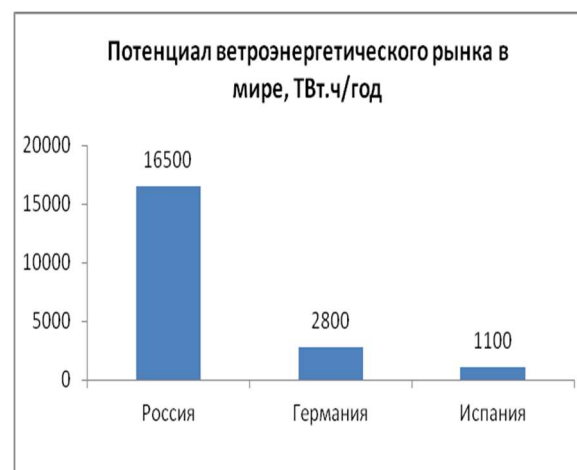


Рис. Потенциал мирового рынка ветроэнергетики

Электроэнергетика России представляет собой сложный производственный комплекс, который включает в себя объекты генерации, транспортировки и передачи электроэнергии.

В соответствии с государственной экономической политикой основными направлениями функционирования и развития электроэнергетической системы России для обеспечения энергетической безопасности и экономической устойчивости электроэнергетического комплекса должны стать: использование потенциала энергосбережения и повышение эффективности использования электрической энергии для всех ка-

тегорий потребителей; широкомасштабное использование возобновляемых источников энергии; инновационная и децентрализованная энергетика [1].

Технический потенциал и использование энергии ветра в России оценивается порядка 50 ГВт в ветровых зонах в России на побережье и островах Северного Ледовитого океана от Кольского полуострова до Камчатки и на побережье внутренних морей. Порядка трети энергетического потенциала сосредоточено на Дальнем Востоке.

Таким образом, в составе отечественной электроэнергетики в предстоящей перспективе будет развиваться и генерация электроэнергии на базе нетрадиционных энергоресурсов.

Несмотря на то, что Россия по степени использования нетрадиционных и возобновляемых видов энергии находится пока в шестом десятке стран мира, развитие этого направления имеет большое значение, особенно учитывая размеры территории страны.

Ветроэнергетика России пока находится лишь в начальной стадии развития, хотя ее потенциал способен в радикально сжатые сроки изменить ситуацию, сложившуюся в топливно-энергетическом комплексе страны.

Оцененные технические запасы ветроэнергетических ресурсов (ВЭР) страны почти в 15 раз превышают годовую выработку всех электростанций страны в настоящее время.

На данном этапе Россия имеет ничтожную, по сравнению со странами-лидерами, суммарную установленную мощность.

По имеющимся данным на 2015 год в России действуют ВЭС суммарной установленной мощности около 10 МВт без учёта республики Крым, что составляет около 1 % от всех ее ветрогенерирующих мощностей [2].

Значение ветроэнергетики не только в генерировании мощности.

Это наукоемкая, высокотехнологичная отрасль, создающая квалифицированные рабочие места как в самой отрасли, так и в смежных отраслях, включая перевозки тяжеловесных крупногабаритных грузов.

Это способствовало развитию целого направления техники, предназначенной для перевозки лопастей и колонн ветрогенераторов.

Для этого были созданы специальные транспортные средства: длинномерные полуприцепы с большим ходом подвески для перевозки лопастей, адаптеры для захвата секции колонны на

базе низкорамных тяжеловозных тележек, адаптеры для лопасти на базе самоходного модульного транспортного средства.

Россия пока находится в самом начале своего развития, хотя взят масштабный курс на развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

По итогам проведенного в 2017 г. отбора проектов ВИЭ, Инвестиционный фонд развития ветроэнергетики, созданный компаниями «Фортум» и «Роснано», получил право на строительство 1000 МВт ветрогенерирующих мощностей в 2018–2022 гг. с долей локализации 65%.

Весь объем будущих вводов ВЭС до 2024 г. составит более 3 ГВт (рис. 3).



Рис. 3– Планируемый ввод ветрогенерирующих мощностей

В настоящее время в республике Крым в промышленной эксплуатации находятся 7 ветроэлектростанций [2], суммарная мощность которых 88,91 МВт:

- Останкинская ВЭС установленной мощности 25 МВт;
- Тарханкутская ВЭС установленной мощности 22,45 МВт;
- Сакская ВЭС установленной мощности 20,82 МВт;
- Пресноводненская ВЭС установленной мощности 7,39 МВт;
- Донузлавская ВЭС установленной мощности 6,78 МВт;
- Судакская ВЭС установленной мощности 3,76 МВт;
- Восточно-Крымская ВЭС установленной мощности 2,81 МВт.

Из-за нестабильности альтернативной гене-

рации во время ограничения подачи электроэнергии в Крыму в конце 2015 специалисты не смогли задействовать существующие мощности солнечной и ветроэнергетики.

Власти Крыма считают строительство новых ВЭС нецелесообразным из-за нестабильной выработки, зависящей от погоды, и требующего стопроцентного резервирования.

Однако, учитывая, что к 2020 г. прогнозная нагрузка на энергосистему Крыма вырастет до 3,1 ГВт за счет реализации крупных инвестиционных проектов, реконструкции инфраструктуры Черноморского флота, а также развития оборонно-промышленного комплекса, в период с 2018 по 2030 годы планируется провести мероприятия по техническому перевооружению действующих ВЭС для увеличения их мощности путем замены ветроустановок на установки большей мощности. При существующих сегодня тарифах развитие ветроэнергетики Крыма возможно лишь при поддержке государственных программ [4].

В настоящее время суммарные установленные мощности ветроэнергоустановок в России не превышают нескольких десятков мегаватт, а доля ветроэнергетики в общем объеме производства электроэнергии составляет порядка 1%. Причины низкого уровня развития объясняются несколькими причинами.

Во-первых, развитие ветроэнергетики порождает ряд экологических проблем.

Прежде всего, это создаваемые при работе лопастей шум, инфразвуковые колебания и вибрации, отрицательно действующие на людей, технику и животных.

В районе ветропарков перестают селиться животные и птицы. Есть риски, связанные с отрывом лопастей и другими авариями на крупных ветроэлектростанциях.

Кроме того, при работе множества ветрогенераторов на больших площадях возможно локальное снижение силы и изменение конфигурации ветров. Дополнительную проблему создаёт необходимость утилизации лопастей, исчерпавших свой ресурс.

Во-вторых, большие расстояния и слабо развитая транспортная инфраструктура затрудняют развитие ветроэнергетики и создают дополнительные трудности в обслуживании ветроагрегатов и ветростанций.

В-третьих, развитие ветроэнергетики тормозится прежде всего из-за высокой металлоёмкости, сложности конструкций ветроэнергоустановок, потребности в больших площадях, низкой продуктивности и недостаточной стабильности работы.

По информации Российской ассоциации ветроиндустрии (РАВИ), металлоёмкость современного ветрогенератора мощностью 3 МВт достигает 350 тонн. Если ТЭС в 1 ГВт требует площади порядка нескольких гектаров, то под ветропарк такой же мощности приходится отводить уже тысячи гектаров.

В-четвертых, наличие больших запасов углеводородов — более дешёвого энергетического сырья.

Однако есть очевидная причина для ускорения темпов развития ветроэнергетики в России: российские потребители сталкиваются с дороговизной подключения к энергосетям, и для них выгоднее использовать местные возобновляемые ресурсы, в том числе энергию ветра.

Кроме того, более 70% территории нашей страны, на которой проживает около 20 млн человек, находится вне системы централизованного энергоснабжения. Районы Российского Севера, и в частности Обская губа, Кольский полуостров, большая часть прибрежной полосы Дальнего Востока, по мировой классификации относятся к самым ветреным зонам.

Среднегодовая скорость ветра на высотах 50—100 м, для которых производятся современные ветроагрегаты, составляет 11—12 м/с, что вдвое превышает экономический порог ветроэнергетики, связанный с окупаемостью ВЭС.

Таким образом, в отличие от других стран, Россия, обладая богатыми запасами традиционных энергоресурсов и имея свои географические и климатические особенности, будет развивать ветроэнергетику лишь в отдельных регионах, где использование этих ресурсов окажется экономически целесообразным.

Список литературы

1. Об энергетической стратегии России на период до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р [Электронный ресурс]. — Дата сохранения: 02.11.2015. — Режим доступа: www.consultant.ru, свободный (дата обращения 20.05.2019).
2. Развитие ветроэнергетики в мире [Электронный ресурс]. — Режим доступа: electricalschool.info/energy/1554-razvitie-vetrojenergetiki-v-mire.html, свободный (дата обращения 20.05.2019).
3. Цифры и факты. — Ветроэнергетика 2019. — Режим доступа: <https://www.windrussiaconference.com/tsifry-i-fakty>, свободный (дата обращения 20.05.2019).
4. Neftegaz.RU [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/>, свободный (дата обращения 20.05.2019).

References

1. Ob energeticheskoy strategii Rossii na period do 2030 goda. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 13.11.2009 № 1715-r [Elektronnyy resurs]. — Data sokhraneniya: 02.11.2015. — Rezhim dostupa: www.consultant.ru, svobodnyy (data obrashcheniya 20.05.2019).
2. Razvitiye vetroenergetiki v mire [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: electricalschool.info/energy/1554-razvitie-vetrojenergetiki-v-mire.html, svobodnyy (data obrashcheniya 20.05.2019).
3. Tsifry i fakty. — Vetroenergetika 2019. — Rezhim dostupa: <https://www.windrussiaconference.com/tsifry-i-fakty>, svobodnyy (data obrashcheniya 20.05.2019).
4. Neftegaz.RU [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: <https://neftegaz.ru/news/>, svobodnyy (data obrashcheniya 20.05.2019).

УДК 621.316.718

Совершенствование защиты трансформатора от короткого замыкания на основе спектрального анализа тока

Л. Н. Канов¹, Н. С. Кутовой²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lkanov48@mail.ru

Статья поступила 13.05.2019 г.; после доработки 15.05.2019 г.

Аннотация

Построено математическое описание режима включения силового трансформатора в виде системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений. Показана возможность отстройки защиты трансформатора от бросков тока намагничивания при выявлении второй гармоники первичного тока. Выполнено математическое моделирование процесса включения трансформатора с различными нагрузками и в режиме короткого замыкания.

Ключевые слова: силовой трансформатор, математическое моделирование, бросок тока намагничивания, вторая гармоника тока, короткое замыкание.

Perfection of Transformer defence from a Short circuit on the basis of Current spectrology

L.N. Kanov¹, N.S. Kutovoy²

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
lkanov48@mail.ru

Received 13.05.2019 y.; received in final form 15.05.2019 y.

Abstract

Mathematical description of the regime of including of power transformer is built as a system of nonlinear algebraic and differential equalizations. Possibility of rebuilding of defence of transformer is showed from the throws of current of magnetizing at the exposure of the second harmonic of primary current. The mathematical design of process of including of transformer is executed with the different loadings and in the regime of short circuit.

Keywords: power transformer, mathematical design, throw of current of magnetizing, second harmonic of current, short circuit.

Введение

В связи с развитием и усложнением электроэнергетических систем и ростом единичной мощности генераторов и трансформаторов повышаются требования к быстрдействию, чув-

ствительности и надежности их релейной защиты.

Все большее значение получают релейные защиты с использованием микроконтроллеров, которые открывают новые возможности по улучшению параметров устройств защиты [1, 2].

В связи с этим в статье рассматривается вопрос совершенствования защиты силовых трансформаторов от токов короткого замыкания. [3].

При включении силовых трансформаторов под напряжение или восстановление на них напряжения после отключения внешнего короткого замыкания в первичной обмотке трансформатора возникает резкий бросок тока намагничивания. Максимальное значение этого тока в несколько раз превышает номинальный ток трансформатора. Резкое нарастание тока намагничивания объясняется насыщением магнитопровода трансформатора. График первичного тока имеет асимметричный характер, и переходный процесс длится единицы секунд. Этот ток через измерительный трансформатор попадает на реле защиты, вызывая его срабатывание и отключение силового трансформатора.

Для предотвращения ложного срабатывания реле защиты применяется способ замедления защиты на время порядка одной секунды [2], однако при этом теряется быстродействие защиты. Применяются более сложные способы отстройки от токов намагничивания: блокировки от понижения напряжения [3]. Один из них заключается в дифференциальной токовой отсечке, когда на выходе защиты устанавливается промежуточное реле с временем срабатывания 2...3 периода промышленной частоты. За это время намагничивающий ток успевает снизиться, что позволяет не отстраиваться от максимального броска намагничивающего тока. Достоинством этого способа является простота и быстродействие, однако он имеет ограниченную чувствительность и обычно применяется на трансформаторах небольшой мощности.

Другим способом является применение быстронасыщающихся трансформаторов.

Броски намагничивающего тока имеют значительную аperiodическую составляющую, которая не трансформируется на вторичную обмотку этого трансформатора. В реле защиты попадает лишь переменная составляющая намагничивающего тока, однако за счет насыщения сердечника быстронасыщающегося трансформатора трансформация переменной составляющей снижается, что приводит к замедлению защиты и запрещает срабатывание реле.

С развитием микропроцессорной техники появились новые возможности отстройки защиты от бросков тока намагничивания. Одной из них, основанной на спектральном анализе первичного тока трансформатора посвящена настоящая статья.

Целью статьи является повышение надежности в работе защиты трансформаторов от токов короткого замыкания и отстройки бросков намагничивающего тока путем анализа спектрального анализа первичного тока трансформатора и оценки величины его второй гармоники.

Математическая модель процесса включения трансформатора

Схема замещения однофазного трансформатора изображена на рис.1 с общепринятыми обозначениями [4].

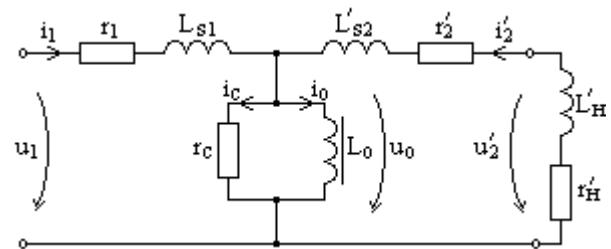


Рис. 1. Схема замещения трансформатора.

Уравнения переходного процесса включения трансформатора на синусоидальное напряжение имеют вид

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= r_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \\ 0 &= u'_2(t) + r'_2 i'_2 + L'_{s2} \frac{di'_2}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \\ i_1 + i'_2 &= i_c + i_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $u_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$ – напряжение сети; i_0 – ток намагничивания; i_c – ток потерь в стали; $\Phi = BS$ – магнитный поток; S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

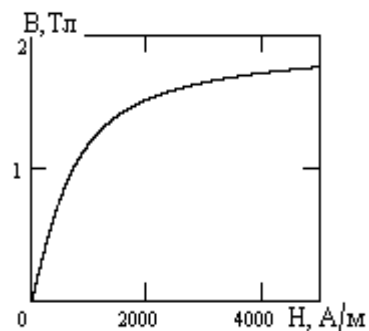


Рис. 2. Вебер – амперная характеристика магнитопровода.

Вебер – амперная характеристика магнитопровода (рис.2) в целях исследования аппроксимируется выражением

$$B = a \cdot \arctg bH + cH, \quad (2)$$

где a, b, c – коэффициенты аппроксимации. Магнитодвижущая сила в магнитной цепи выражается через токи

$$w_1 i_0 = H \cdot l = w_1 \cdot (i_1 + i'_2 - i_c),$$

где l – средняя длина магнитопровода.

Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{w_1}{l} (i_1 + i'_2 - i_c). \quad (3)$$

Определим в уравнениях (1) производную магнитного потока с учетом (2)

$$\frac{d\Phi}{dt} = w_1 \frac{dB}{dt} = w_1 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{1 + (bH)^2} + c \right) \frac{dH}{dt}, \quad (4)$$

где по (3) имеем $\frac{dH}{dt} = \frac{w_1}{l} \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right)$.

Из рис.1 и выражений (3), (4) выводим

$$\begin{aligned} i_c &= \frac{u_0}{r_c} = \frac{w_1 S}{r_c} \frac{dB}{dt} \\ &= \frac{w_1^2 S}{r_c \cdot l} \left(\frac{a \cdot b}{1 + (bH)^2} + c \right) \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Из двух первых формул (1) и выражения (5) получаем дифференциальные уравнения для токов

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= r_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + W \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right); \\ -u'_n(t) &= r'_2 i'_2 + L'_{s2} \frac{di'_2}{dt} + W \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right); \\ i_c &= W \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right), \end{aligned} \right\}$$

где $W = \frac{w_1^2 S}{l} \left(\frac{a \cdot b}{1 + (bH)^2} + c \right)$ и H определяется из выражения (3).

Для приведения этих уравнений к нормальной форме разрешим их относительно производных

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= -\frac{1}{L_{s1}} (r_c i_c - u_1 + r_1 i_1); \\ \frac{di'_2}{dt} &= -\frac{1}{L'_{s2} + L'_n} (r_c i_c + (r'_2 + r'_n) i'_2); \\ \frac{di_c}{dt} &= -\frac{1}{L_{s1}} \left[r_c i_c \left(1 + \frac{L_{s1}}{W} \right) - u_1 + r_1 i_1 \right] - \\ &\quad - \frac{1}{L'_{s2} + L'_n} (r_c i_c + (r'_2 + r'_n) i'_2). \end{aligned} \right\}$$

Результаты численного моделирования процесса включения трансформатора

Полученные уравнения решались для трансформатора мощностью 1,5 кВА с типовыми данными: $r_1 = 0,4$ Ом; $r'_2 = 0,3$ Ом; $L_{s1} = 80$ мГн; $L'_{s2} = 80$ мГн; $r_c = 800$ Ом; $l = 0,5$ м; $S = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м²; $w_1 = 500$ [4]. Расчет выполнялся при включении трансформатора на напряжение $U_m = 1$ кВ промышленной частоты при $\psi_1 = 0,1\pi$ с принятыми коэффициентами аппроксимации:

$$a = 1,2; \quad b = 1,5 \cdot 10^{-3}; \quad c = 6 \cdot 10^{-6}.$$

Расчет выполнялся на интервале времени длительностью 0,2с при нулевых начальных значениях токов для режима включения трансформатора на холостом ходу и на нагрузку $r_n = 1$ Ом, $x_n = 31,5$ Ом.

Рассчитывался также режим короткого замыкания в момент времени $t = 2$ с при работе трансформатора на холостом ходу.

Спектральный состав первичного тока определялся по выражению

$$i_1(t) = I_{01} + \sum_{k=1}^3 a_k \sin k\omega t + b_k \cos k\omega t.$$

Коэффициенты a_k и b_k находились по формулам:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_1(t) \sin k\omega t dt; \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_1(t) \cos k\omega t dt.$$

Интегралы подсчитывались по выражению [5]

$$\int_a^b f(t) dt \approx \frac{b-a}{6m} \cdot [y_0 + y_{2m} + 2Y_{чет} + 4Y_{неч}], \quad (6)$$

где

$$Y_{чет} = y_2 + y_4 + \dots + y_{2m-2};$$

$$Y_{неч} = y_1 + y_3 + \dots + y_{2m-1};$$

y_i – значения подинтегральной функции на границах интервалов, $i = 0, 1, \dots, 2m$; $2m$ – четное число равных интервалов ($2m = 10^3$).

Графики переходных процессов токов трансформатора и спектральный состав первичного тока изображены на рис.3 – 5.

Рис. 3,а показывает намагничивающий ток первичной обмотки при включении трансформатора без нагрузки. Ток имеет апериодическую составляющую $I_{01} = 11,7$ А; амплитуду основной гармоники $I_{1m} = 21,3$ А и всего лишь втрое меньшую амплитуду второй $I_{2m} = 6,65$ А.

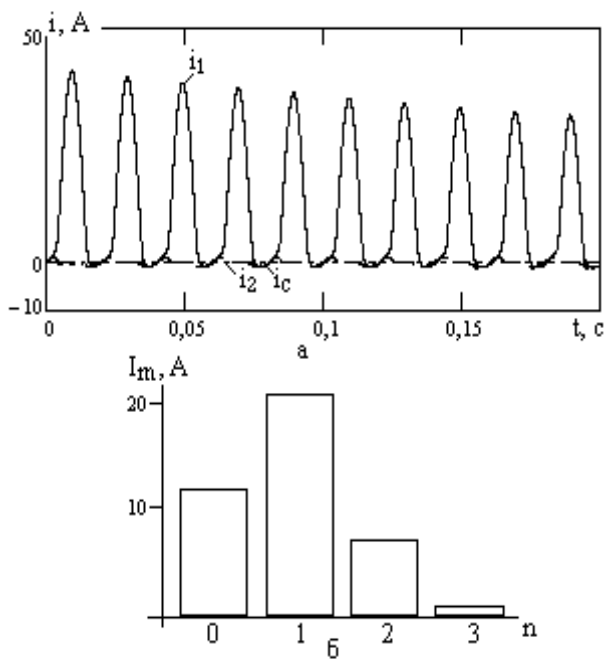


Рис. 3. Включение трансформатора на холостой ход: а) графики токов; б) спектр первичного тока.

Амплитуда третьей гармоники составляет $I_{3m} = 0,627$ А. Наибольшая амплитуда первичного тока составляет 41 А.

Таким образом, вторая гармоника намагничивающего тока первичной обмотки включения трансформатора на холостой ход имеет достаточную величину.

На рис.4 изображены графики токов процесса включения трансформатора под индуктивной нагрузкой с нулевых начальных условий. Рис. 4,а показывает, что постоянная составляющая и основная гармоника первичного тока почти не изменились по сравнению с предыдущим режимом $I_{01} = 11,82$ А; $I_{1m} = 21,3$ А.

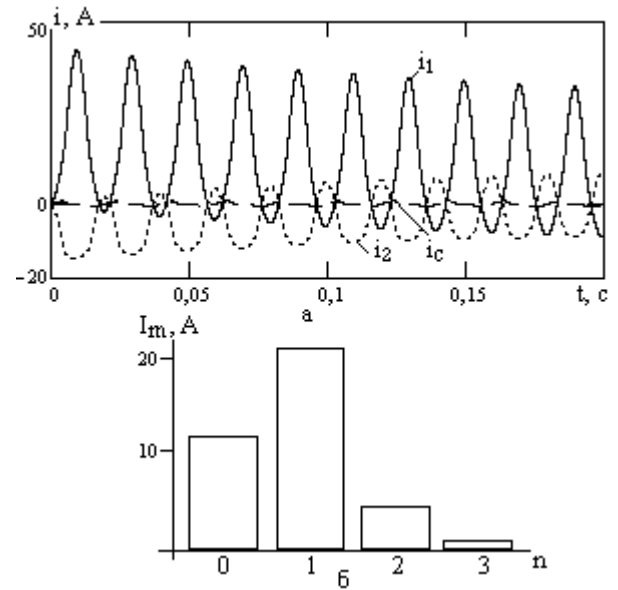


Рис. 4. Включение трансформатора на нагрузку: а) графики токов; б) спектр первичного тока.

Вместе с тем, вторая и третья гармоники первичного тока по-прежнему имеют место: $I_{2m} = 4,0$ А; $I_{3m} = 0,89$ А, хотя амплитуда второй гармоники заметно уменьшилась.

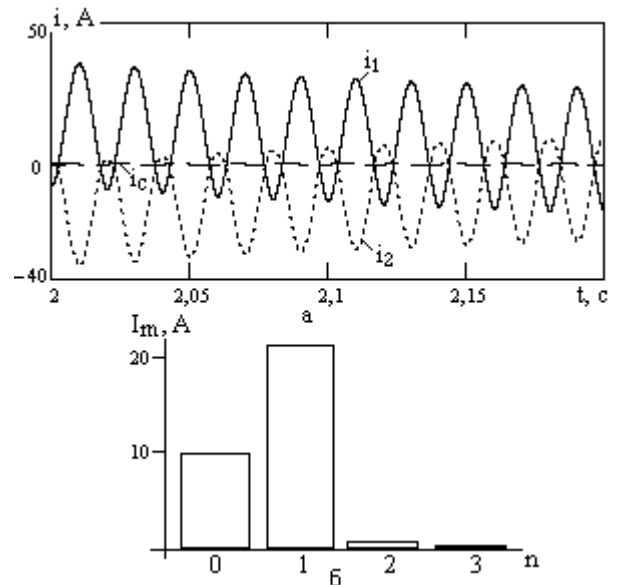


Рис. 5. Короткое замыкание трансформатора в режиме холостого хода: а) графики токов; б) спектр первичного тока.

Процесс короткого замыкания в момент времени $t = 2$ с трансформатора, находящегося в режиме холостого хода, изображен на рис.5. Рисунок показывает наряду с апериодической составляющей абсолютное доминирование основной гармоники: $I_{01} = 9,83$ А; $I_{1m} = 21,3$ А;

$I_{2m} = 0,733 \text{ A}$; $I_{3m} = 0,394 \text{ A}$. Наибольшая амплитуда первичного тока составляет 38А.

Таким образом, в первых двух случаях эксплуатационного включения трансформатора на холостой ход или на рабочую нагрузку в спектре тока первичной обмотки возникает вторая гармоника, наиболее заметная в первом случае. В режиме короткого замыкания вторая гармоника мала. Величины основной гармоники тока в рассмотренных случаях примерно равноценны.

Поэтому наличие второй гармоники может служить надежным признаком отсутствия аварийного режима при высокой наибольшей амплитуде первичного тока, тем более что в режиме короткого замыкания эта амплитуда имеет меньшие значения, чем при включении трансформатора на нагрузку. Применение высокочастотного контроллера позволяет идентифицировать появление второй гармоники уже за первый период промышленной частоты и блокировать срабатывание защитного реле.

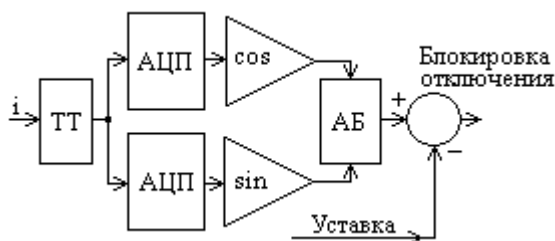


Рис. 6. Блок – схема блокировки защиты при включении трансформатора.

Блок – схема устройства, предохраняющего от нежелательного срабатывания защитного реле, изображена на рис.6. Сигнал, пропорциональный фазному току i силового трансформатора, через трансформатор тока ТТ переводится посредством аналого – цифрового преобразователя АЦП в цифровой код. Далее, в арифметическом устройстве АБ в соответствии с (6) подсчитывается амплитуда второй гармоники фазного тока на периоде. Если эта величина превышает уставку, и вторая гармоника фазного тока достаточно велика, вырабатывается сигнал на блокировку отключения силового трансформатора.

Заключение

При включении силовых трансформаторов под напряжение в первичной обмотке трансформатора возникает резкий бросок тока намаг-

ничивания. Максимальное значение этого тока в несколько раз превышает номинальный ток трансформатора, что приводит к ложным срабатываниям релейной защиты.

Для предотвращения этого в статье предлагается на интервале времени, равном периоду промышленной частоты, оценивать спектральный состав первичного тока.

Так как намагничивающий ток существенно несимметричен, и в нем весьма заметно проявляется вторая гармоника, то наличие этой гармоники в спектре первичного тока служит основанием для торможения защитного реле отключения трансформатора.

Список литературы

1. Сиротко В.К. О построении бесконтактных релейных защит с использованием полупроводниковых и ферромагнитных элементов / Электроэнергетика. М., Л.: изд-во «Наука», 1964. С.131–138.
2. Кузнецов Д.Ф. Векторные диаграммы в схемах релейной защиты и автоматики. М.: изд-во НЦ ЭНАС, 2007. 64 с.
3. Чернобровов Н.В. Релейная защита. М.: изд-во «Энергия», 1971. 624 с.
4. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. Ростов н/Д, изд-во «Феникс», 2008. 715 с.
5. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. М.: изд-во «Наука», 1972. 592 с.

References

1. Sirotko V.K. *O postroenii beskontaktnykh releyinykh zaschit s ispolzovaniem poluprovodnikovyykh I ferromagnitnykh elementov* [About a construction without contact relay defences with the use of semiconductor and ferromagnetic elements]. Moscow, Leningrad: Izd. "Nauka", 1964. P.131-138.
2. Kuznetsov D.F. *Vektornye diagrammy v shemah releinoi zaschity I avtomatiki* [Vectograms in the charts of relay defence and automation]. Moscow: Izd. NTC ENAS, 2007, 64 p.
3. Tchernobrovov N.V. *Releinaia zaschita* [Relay defence]. Moscow: Izd. "Energiua", 1971, 624 p..
4. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. *Peredatcha I raspredelenie elektricheskoi energii* [Transmission and distributing of electric energy]. Rostov on/D, Izd. "Feniks", 2008, 715 p.
5. Zeldovitch Ua.B., Myshkis A.D. *Elementy prikladnoi matematiki* [Elements of the applied mathematics]. Moscow: Izd. "Nauka", 1972, 592 p..

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.9

Анализ производительности гибридных фото-ветроэлектрических установок

Абдали Лаит Мохаммед А.¹, Аль-Руфай Ф. М.², Якимович Б.А.²,
Кувшинов В.В.²

¹University of Kufa, г. Говернорат Наджаф, Республика Ирак; laithm.abood@uokufa.edu.iq

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия.

Статья поступила 16.05.2019 г.; после доработки 21.05.2019 г.

Аннотация

Эта статья в основном исследует точность прогноза производительности гибридной солнечной и ветровой систем. Используя смешанную модель авторегрессии и динамической системы, мы проверяем предсказуемость гибридной системы, сравниваем ее с индивидуальным прогнозированием солнечной энергии и рядами ветра. После анализа ошибок предсказуемость гибридной системы показывает лучшую производительность, чем солнечная или ветровая энергия для солнечной радиации и данных. Ошибки прогнозирования были уменьшены на 13% до более чем 30% согласно различным анализам ошибок. Этот результат указывает на преимущество гибридной солнечной и ветровой систем по сравнению с солнечной и ветровой системами, взятыми по отдельности.

Ключевые слова: гибридная энергия солнечного ветра; проектирование энергосистемы; модель сопряженной авторегрессионной и динамической системы (CARDS); Фотоэлектрические.

Analysis of Performance Hybrid PV- Wind Energy

Abdali Layth Mohammed A.¹, Al-Rufae Faez M.², Yakimovich B. A.²,
Kuvshinov V.V.²,

¹University of Kufa, г. Говернорат Наджаф, Республика Ирак; laithm.abood@uokufa.edu.iq

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.

Received 16.05.2019 y.; received in final form 21.05.2019 y.

Abstract

This paper mainly researches the performance prediction accuracy of a hybrid solar and wind system. Through a mixed autoregressive and dynamical system model, we test the predictability of the hybrid system, compare it with individual solar, and wind series forecasting. After error analysis, the predictability of the hybrid system shows a better performance than solar or wind for solar radiation and data. The prediction errors were reduced by 13% to more than 30% according to various error analyses. This result indicates an advantage of the hybrid solar and wind system compared to solar and wind systems taken individually.

Keywords: hybrid solar wind energy; design power system; coupled autoregressive and dynamical system (CARDS) model; Photovoltaic.

Введение

Принимая во внимание постоянно растущее потребление энергии, а также истощаемость тра-

диционных источников энергии и все более серьезный парниковый эффект, особое внимание было уделено возобновляемым источникам

энергии. Солнце и ветер — самые перспективные и широко используемые источники возобновляемой энергии в мире. Тем не менее нет солнечного излучения ночью и иногда нет ветра в солнечный день. В недавних исследованиях большинство исследователей сосредоточились в основном на четырех областях исследований. Первая область соответствует политике в области возобновляемых источников энергии, которая устанавливает правила для расширения использования возобновляемых источников энергии в нескольких регионах, странах или различных источниках энергии для дополнения друг к другу [1] или для использования в качестве источника самовосстанавливающихся источников энергии для мини автономных сетевых систем с целью экономии денег и оказывают меньшее воздействие на окружающую среду [2]. Вторая область — это использование энергии ветра и солнца для генерации других носителей энергии, которые могут быть сохранены, таких, как водород, или для преобразования электричества, генерируемого из возобновляемых источников, в другие виды энергии, такие как аккумуляторная система хранения [3].

Эта статья будет сфокусирована на одном аспекте последних двух областей исследования путем обсуждения моделирования данных и прогнозирования. Многие исследователи сосредоточены на моделировании и создании гибридной солнечной и ветровой системы, чтобы преодолеть их отдельные недостатки и усилить их положительное влияние на окружающую среду. Последние две области исследований моделирования гибридной солнечной и ветровой энергии для подключенных к сети и автономных систем, с точки зрения цели исследования, обычно нацелены на адаптацию спроса к предложению или поиску, для экономического оптимума. Конечно, эти два различных направления исследований также пересекаются друг с другом в соответствии с целями исследования [4]. Эта статья является типичной моделью оптимизационного решения для систем возобновляемой энергии, связанных с энергосистемой. Показан пример типичного метода оптимизации с целью максимизации экономических выгод. Благодаря максимальной надежности и минимальным затратам они используют два алгоритма итеративного поиска на основе ограничений для оптимального определения размеров ветряных турбин, солнечных фотоэлектрических систем и систем хранения. В своем исследовании, чтобы удовлетворить потребности небольшого острова, они ис-

пользуют концентрированную солнечную электростанцию в качестве системы хранения, чтобы обеспечить стабильность энергоснабжения. Многие документы посвящены системной интеграции, стабильности и экономическим выгодам. Однако точность прогнозирования возобновляемой энергии одинаково важна для гибридных систем с точки зрения нестабильности возобновляемой энергии, layth M. [5] разработали процесс расчета, используя группу моделей в процессе нечеткого алгоритма, чтобы получить оптимальное решение для прогнозирования почасовых данных о часах. Конечно, есть много исследований предсказания ветра и солнца, но не так много работ, которые рассматривают объединенные ветер и солнце. Поэтому наше предыдущее исследование модели связанных авторегрессионных и динамических систем (CARDS) используется здесь в качестве эталонной модели для проверки прогнозирующей эффективности гибридной солнечной и ветровой систем. В статье будут рассмотрены преимущества гибридной солнечно-ветровой системы с точки зрения предсказуемости. Первый раздел — это краткосрочное прогнозирование с использованием связанной модели авторегрессионной и динамической системы (CARDS) [6] для моделируемой солнечной системы. Затем модифицированная модель CARDS используется для реальных выходных данных ветряной фермы. После этого будет обсуждаться модель CARDS, используемая для прогнозирования гибридной солнечной и ветровой систем. В следующем разделе анализ ошибок используется для проверки результатов модели, и заключение будет рассмотрено в конце.

Гибридный анализ эффективности солнечных и ветровых прогнозов

Ветро-солнечная энергетическая система не влияет на точность прогноза. средняя стоимость энергии ветра и солнца составляет 0,045 и 0,05 американских долларов за киловатт-час (кВтч) соответственно.

Эти две затраты на производство электричества постепенно уменьшаются, и в конечном итоге единица, производящая стоимость солнечной энергии, может быть такой же или даже меньше, чем стоимость энергии ветра. Поэтому можно предположить, что стоимость единицы энергии ветра и солнца может рассматриваться как одна и та же.

Исходя из этого предположения, мы исполь-

зуем удвоенную мощность ветровой электростанции или устанавливаем солнечные панели той же мощности с точки зрения прогнозирования, чтобы определить лучший выбор.

В соответствии с этим предположением, следующие разделы будут посвящены настройке для проверки предсказуемости ветра, солнца и их гибридов [7].

1.1. Данные

Выход энергии ветровой электростанции Kufa измеряли глобальную солнечную радиацию с августа 2016 года по январь 2017 года; 30 минут данных были использованы для демонстрации того, как модель CARDS [8] был использован для прогнозирования производительности гибридной солнечной и ветровой системы.

Ветряная электростанция Kufa, широта $34^{\circ} 51'$ южной широты, долгота $138^{\circ} 33'$ восточной долготы и часовой пояс AEST (UTC + 9,5). Набор данных ветровой электростанции состоит из 8784 (48×183) получасовых значений мощности ветра в общей сложности.

Установленная мощность ветрогонка Kufa составляет 34,5 МВт. Набор солнечных панелей состоит из 8784 (48×183) получасовых глобальных значений радиации в целом.

Среднее получасовое глобальное излучение составило 258 Вт/м^2 , включая ночной период, а максимальное значение составило 1139 Вт/м^2 . Чтобы соответствовать той же установленной мощности ветряной электростанции Kufa в 32,5 МВт, и согласно данным 30-минутной глобальной солнечной радиации, измеренной в аэропорту Наджаф, поток энергии предполагаемой солнечной электростанции показан на рисунке 1.

Таблица 1. Информация о выходе ветровой электростанции и предполагаемой солнечной энергии.

тип	Мощность МВт	Номинальная мощность МВт	Средняя мощность МВт	Максимальная мощность МВт	Кол-во панелей	Эффективность
Ветровая	32,5	16,9	5,4	47,5	8784	17%
солнечная	32,5	19,65	4,5	39,1	8784	17%
гибридная	65	32,1	9,9	86,6	8784	17%

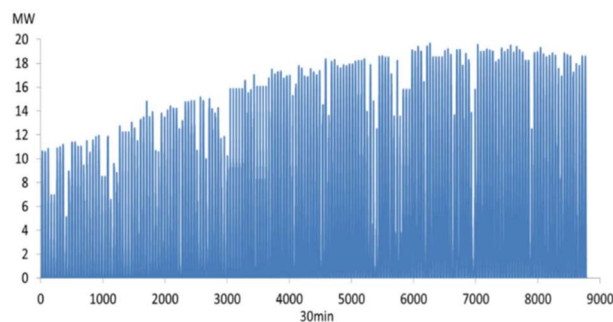


Рис. 1. Поток энергии предполагаемой солнечной фермы мощностью 32,5 МВт.

Установленная мощность солнечной фермы составляет 34,5 МВт, измеренная площадь солнечных панелей около $202,941 \text{ м}^2$, а коэффициент полезного действия солнечных панелей около 17%. Обратите внимание, что эти два местоположения достаточно близки, чтобы можно было рассматривать их как объединенную солнечную и ветровую систему, как будто общий выход подается в сеть через одно соединение. В таблице 1 приведена общая информация о ветровых электростанциях и предполагаемой солнечной энергии.

1.2. Сопряженная авторегрессионная и динамическая система (CARDS) для солнечной

Модель CARDS построена на основе ряда Фурье, авторегрессионных (AR) методов, модели динамической системы с фиксированным компонентом [9]. Модель является резонансной моделью для рынка электроэнергии, в которой используется одновременное присутствие критической точки Хопфа, периодического воздействия и шума в двумерной неавтономной системе стохастических дифференциальных уравнений первого порядка для логарифмической цены и производной логарифмической модели. цена.

Фиксированный компонент - это переменная конструкция в нашей предыдущей статье, предназначенная для учета измеренных данных в моменты времени t и $t - 1$, чтобы дополнительно исправить проблему задержки изменения модели. Здесь ряд Фурье в основном используется для захвата

Здесь ряд Фурье в основном используется для захвата характеристик периодических изменений данных, которые являются нелинейной

частью. Авторегрессионный компонент используется для моделирования линейной части данные. Модель CARDS построена с использованием программы Visual Basic® (VB - это универсальный объектно-ориентированный язык программирования, разработанный Microsoft®).

Первый шаг является использование рядов Фурье для сохранения данных. Следуя [10] и используя результаты анализа спектра мощности, ряд Фурье можно записать как S_t , а результат показан в таблице 2.

Таблица 2. Модель ряда Фурье в предполагаемых данных о потоке энергии солнечной фермы мощностью 34,5 МВт.

параметры	частота	различие, %
1\год	$2\pi/8784$	3,78
1\день	$2\pi \cdot 182/8784$	2,49
	$2\pi \cdot 183/8784$	66,92
	$2\pi \cdot 184/8784$	0,97
1\день	$2\pi \cdot 365/8784$	0,14
	$2\pi \cdot 366/8784$	10,38
	$2\pi \cdot 367/8784$	0,01

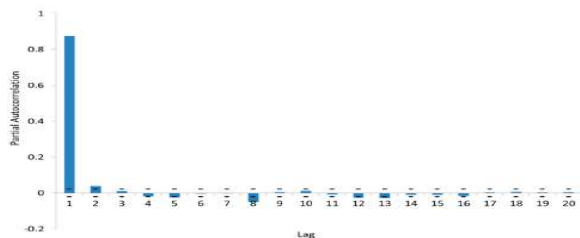


Рис.2. Частичная автокорреляционная функция для несезонных данных

Здесь α_0 - среднее значение данных, α_1 и β_1 - коэффициенты годового цикла, а α_{nm} и β_{nm} - коэффициенты суточного цикла и его гармоник, n и связанных частот биений, m . В таблице 1 показана частота годовых, дневных и дважды-дневных циклов с процентной дисперсией исходного временного ряда, объясняемой вкладом компонента ряда Фурье на каждой частоте. Все значимые значения выделены жирным шрифтом. Из таблицы 1 легко увидеть, что в целом S_t может представлять более 80% дисперсии данных. На рисунке 2 показаны трехдневные ряды Фурье по сравнению с предполагаемыми данными о потоке энергии солнечной фермы.

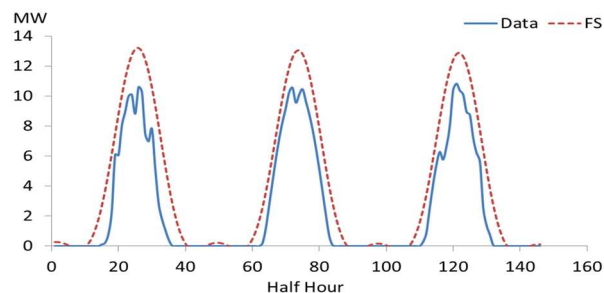


Рис.3. Три дня S_t по сравнению с данными.

Согласно этапам, CARDS модели, следующим шагом является моделирование дезактивированных данных R_t где F_t предполагается солнечная ферма потока энергии на основе аэропорта Наджаф -измерение глобального солнечного излучения 30-минутных данных.

$$R_t = F_t - S_t \quad (1)$$

Методология Коробки-Jenkins включает совместное расследование типовой автокорреляции вместе с частичной функцией автокорреляции. Рис. 3 показывает, что покойные данные следуют типичной модели AR (2), таким образом, R_t может быть написан как,

$$R_t = 0.84 R_{t-1} + 0.04 R_{t-2} \quad (2)$$

На основе этого модель может быть написана как,

$$x_t = R_t - W_t \quad (3)$$

$$R_{t+1} = R_t + Z_t \Delta T \quad (4)$$

Здесь, w_t - шум после того, как модель разработана для R_t и для прогнозирования, что мы не включаем его в модель Lucheroni, и R_{t+1} - прогноз модели Lucheroni. ΔT - отрезок времени, который для наших данных является 1/48, потому что это соответствует происходящим каждые полчаса данным.

Новый компонент Z_t введен, чтобы помочь нам find будущая долина X_{t+1} . Обычные наименьшие квадраты (OLS) используются, чтобы оценить все другие компоненты k ,

$\lambda, \epsilon, \gamma$ и b . Коэффициенты - $k = -8.41$, $\lambda = -0.94 \cdot 10^{-15}$, $\epsilon = 0.15$, $\gamma = -0.0096$ и $b = 2.68$. На рисунке 4 показано, что модель Lucheroni отражает пиковое значение лучше, чем модель AR (по сравнению с рис. 4).

Поэтому модель Lucheroni используется для захвата возрастающей части остаточных значений солнечной радиации, а AR (2) - для падающих значений.

После объединения моделей AR и Lucheroni фиксированный компонент используется для

дальнейшего повышения точности комбинированной модели AR и Lucheroni (поскольку больше детали видит [15]).

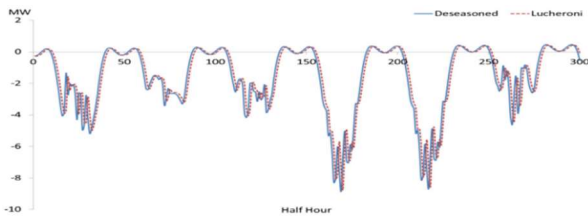


Рис. 4. Модель Lucheroni по сравнению с deseasoned данными.

На основе трех различных моделей и одного компонента, общая функция КАРТ и серийных моделей Фурье может быть написана как,

$$\text{Fourier series } S_t \{[(AR, Lucheroni(combine)), fixed_t] \text{ fixedupdata } \} = Data_t - e_t \quad (5)$$

Здесь e_t предполагается, что это белый шум со средним нулем и дисперсией σ^2 . Уравнение (6) показывает, что ряд Фурье используется для захвата сезонной составляющей данных; комбинированная модель AR и Lucheroni используется для линейной части, которая является несезонной составляющей данных; и фиксированный компонент используется для дальнейшего повышения точности прогнозирования путем изменения прогнозирования комбинированной модели AR и Lucheroni. Рис. 5 показывает трехдневную серийную модель Фурье плюс модель CARDS по сравнению с измеренным аэропортом Аделаиды глобальные данные 30 минут солнечного излучения, производящие принятый энергетический поток завода солнечной энергии.

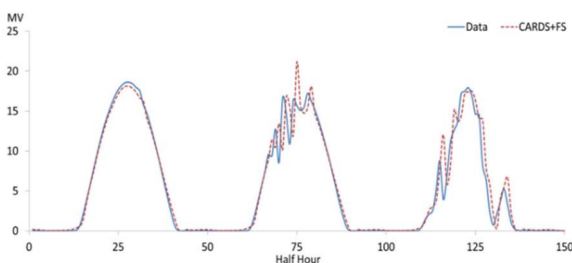


Рис. 5. Трехдневная связанная авторегрессионная и динамическая система (CARDS) плюс модели ряда Фурье по сравнению с данными измерений.

1.3. Модифицированные CARDS для ветра

Было обнаружено, что энергия ветра имеет меньше сезонных характеристик, чем солнечная радиация. Таблица 3 показывает, что только годовой цикл дает незначительный вклад. Следовательно, нет необходимости использовать метод рядов Фурье для сбора сезонной составляющей данных о выходе энергии ветровой электростанции kufa. Авторегрессионный метод может очень хорошо моделировать энергию ветра, поэтому нет необходимости использовать комбинированную модель [11]. Чтобы гарантировать, что предсказуемость сравнивается при одном и том же бенчмарке, мы по-прежнему используем модель CARDS в качестве основного метода для проверки данных об энергии ветра. Обратите внимание, что модель авторегрессии работает достаточно хорошо по сравнению с другими моделями для прогнозирования краткосрочных данных об энергии ветра, такими как модели авторегрессии с самовозбуждающимся порогом (SETAR) и авторегрессии с плавным переходом (STAR) [12].

Посредством частичного анализа автокорреляционной функции выработка энергии ветровой электростанции Starfish Hill осуществляется по типичной модели AR (4) (см. Рис. 6). Функция AR (4) может быть записана как:

$$R_t = 1.097R_{t-1} - 0.191R_{t-2} + 0.094R_{t-3} - 0.017R_{t-4} \quad (6)$$

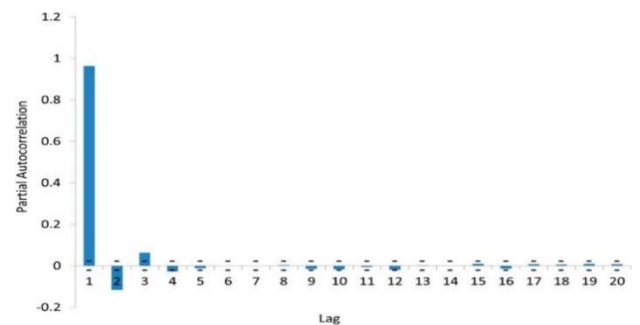


Рис. 6. Функция частичной автокорреляции для данных об энергии ветра в несезонное время.

После оценки модели AR (4) фиксированный компонент используется для дальнейшего улучшения модели авторегрессии, и общая функция модифицированных моделей CARDS может быть записана как

$$\left(\underbrace{AR, fixed}_t \right)_{combine} = Data_t - e_t \quad (7)$$

Здесь, Уравнение (7) указывает, что для измененных КАРТ, нам только нужна модель AR, чтобы захватить линейный компонент и затем использовать фиксированный компонент, чтобы

далее улучшить точность прогнозирования, изменяя прогнозирование модели AR [13].

На рис. 7 показано, как в течение семи дней модель CARDS согласуется с данными по энергии ветровой электростанции kufa.

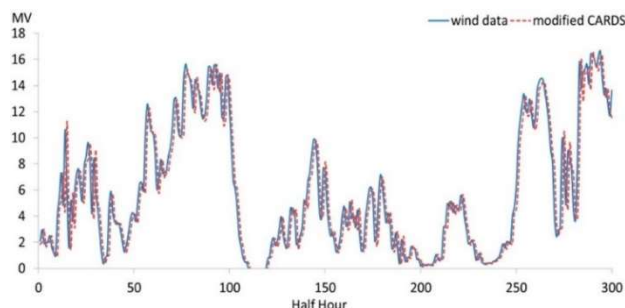


Рис. 7. Измененная модель CARDS по сравнению с данными энергии ветра

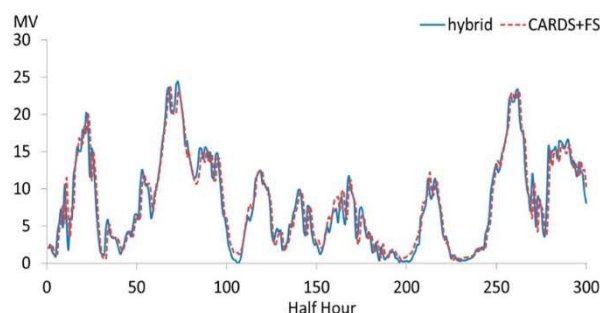


Рис. 8. Частичная автокорреляционная функция для deseasoned гибридных данных.

1.4. Гибридная солнечная и ветровая

Ряды Фурье и модели CARDS все еще используются здесь для прогнозирования гибридных данных о солнечной и ветровой энергии. Опять же, мы подчеркиваем, что та же модель используется для поддержания анализа предсказуемости в рамках одного и того же ориентира, хотя сезонные характеристики гибридной солнечной и ветровой систем меньше, чем сама солнечная, она все же показывает довольно сильную сезонную особенность с объяснением более 47% отклонений. Все значимые значения указаны жирным шрифтом. В отличие от солнечной энергии, гибридная солнечная и ветровая энергия имеет только сильные циклы один-два раза в день.

Когда вычитается сезонный компонент, данные за сезонные периоды анализируются с использованием автокорреляционного анализа. Функция частичной автокорреляции показывает, что остаток соответствует модели AR (3) (см. Рисунок 8). Затем модель Lucheroni и фиксирован-

ный компонент используются для настройки модели CARDS для гибридных данных о солнце и ветре. На рисунке 9 показана модель рядов Фурье плюс CARDS по сравнению с гибридными данными о солнечной и ветровой энергии [14].

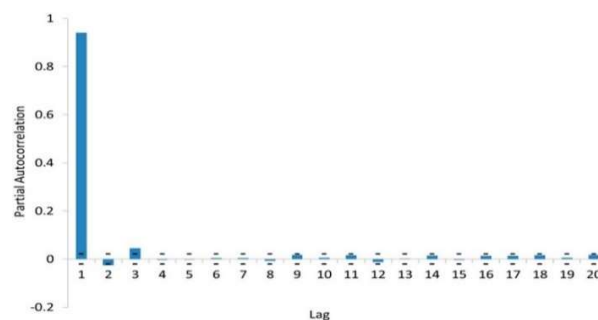


Рис. 9. Модель CARDS плюс сезонный ряд Фурье по сравнению с гибридными энергетическими данными.

Ошибочный анализ

Ошибочный анализ - очень важный шаг для анализа данных и прогнозирования. Это - инструмент для нахождения, какая модель является лучшей. Здесь, мы используем его, чтобы дифференцироваться, который тип данных легче предсказать. В Hoff и др. бумага [15], ошибочные исследования классифицированы в два класса. Один класс состоит из абсолютных ошибок дисперсии, которые являются ошибкой среднего квадрата корня (RMSE) и средней абсолютной ошибкой (MAE). Другой класс представляет относительный процент ошибок. Относительные процентные ошибки используют абсолютную ошибку дисперсии, такую как RMSE или MAE, деленную на среднее значение реальных данных для получения нормализованного значения. Здесь будут использоваться некоторые из наиболее часто используемых мер значения ошибки. Это средняя абсолютная процентная ошибка (MeAPE), средняя ошибка смещения (MBE) и нормализованная среднеквадратическая ошибка (NRMSE).

$$MeAPE = MEDIAN \left(\left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \right) \times 100\% \quad (8)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (9)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}}{\bar{y}} \quad (10)$$

Здесь y_i - прогнозируемое значение, y_i - измеренное значение, $\bar{y}$ - среднее значение измеренного значения.

Обратите внимание, что для анализа ошибок здесь используются полные данные серии прогнозов (8784 (48×183) получасового ветра и солнечной энергии).

Из результатов анализа ошибок, показанных в Таблице 5, легко увидеть, что прогнозирование гибридного солнечного и ветрового прогноза лучше солнечного (в анализ ошибок входит только солнечный угол, превышающий 10 градусов) или ветра самостоятельно.

Из MBE гибрида Солнца и Ветра показывает, что общая ошибка модели CARDS плюс ряд Фурье почти равна нулю.

Это указывает на то, что гибридный солнечный и ветровой метод повышает предсказуемость по сравнению с составными частями. Результаты MeAPE объясняют, что гибридное солнце и ветер эффективно снижают среднюю ошибку данных на 17,9% для данных о Солнце и 34,4% для данных о ветре.

Для отдельных ошибок NRMSE показывает, что гибридная солнечная и ветровая энергия может также улучшить точность прогнозирования на 13,7% и 28% по сравнению с солнечной и ветровой энергией, соответственно, если взято отдельно.

От вышеупомянутых результатов мы можем прийти к заключению, что, по крайней мере, насколько проанализированные ряды затронуты, гибридная солнечная и ветровая энергия может улучшить точность прогноза данных в модели CARDS и ряду Фурье.

Результат также подтверждает одну из особенностей аналитического метода временного ряда, который является, что это очень зависит от данных из предыдущих временных шагов.

Мы полагаем, что когда данные о солнечной и ветровой энергии складываются вместе, относительно сильно изменчивые данные в момент времени t , время $t - 1$ и время $t - 2$ (например, AR (2)) преобразуются в относительно стабилизированные ряды данных.

Следовательно, гибридная солнечная и ветровая система показывает относительно небольшую ошибку.

Причиной этого является то, что модель Lucheroni в сочетании с AR и фиксированным компонентом способствуют снижению влияния сильно изменяющихся данных на предыдущих временных шагах.

Таблица 5. Ошибочный анализ для солнечного, ветра и гибридных солнечных и ветровых данных; α солнечный угол.

Ошибочный анализ	солнечная $\alpha > 10$	ветер	гибридная
MeAPE	0.1655	0.1085	0.1322
MBE	-0.089	0.0002	0.0369
NRMSE	0.2382	0.1716	0.1977

Выводы

В данной статье анализируется точность прогноза данных о солнечной, ветровой и гибридной солнечной энергии, и ветре с использованием модели CARDS в качестве основного метода.

Статья начинается с краткого введения недавних исследований гибридных солнечных и ветровых систем; оптимизация таких систем является актуальной темой для повышения устойчивости систем возобновляемых источников энергии в настоящее время.

Из-за изменчивости поставки возобновляемой энергии, за исключением использования различных возобновляемых источников энергии, чтобы дополнить друг друга, авторы далее разъясняют выгоду использования гибридной системы возобновляемой энергии, более конкретно ветер и солнечный, с точки зрения предсказуемости.

Анализ ошибок показывает, что ошибки уменьшаются на 13–35% как для отдельной, так и для всей серии ошибок. Это также согласуется с особенностями модели CARDS, основанной на характеристиках методов анализа временных рядов, которые заключаются в том, что ценность прогнозирования сильно зависит от данных предыдущих временных шагов.

Поэтому мы приходим к заключению, что под рядом данных и моделями, используемыми в данной статье, предсказуемость гибридной системы выше, чем тот из солнечных или систем ветра, которые рассматривают индивидуально. Эти результаты показывают дополнительное преимущество гибридной системы над одиночной солнечной или ветровой системой.

Список литературы

1. Joanne Hui, Alireza Bakhshai, and Praveen K. Jain, "A Hybrid Wind-Solar Energy System: A New Rectifier Stage Topology," IEEE Conference, February 2016.
2. Abd Ali, Layth & Абдулсахиб Исса, Хайдер.

- (2018). Hybrid power generation using solar and wind energy. 7. 19-26.
3. Energy Information and Administration, (01.05.2018), <http://www.eia.oec.gov>
 4. Абд, Али Лаит Мохаммед, and Хайдер Абдулсахиб Исса. "Hybrid power generation using solar and wind energy." Молодой ученый 7 (2018): 19-26.
 5. Othman M. Hussein Anssari, Layth Mohammed Abd Ali and Haider Ahmed Mohmmmed, 2019. Geothermal Energy as a Resource of Renewable Energy. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14: 3003-3009.
 6. Abd Ali, Layth & Anssari, Othman. (2018). Design and Simulation a hybrid generation system through wind turbine and solar energy with a heat engine. № 38 (224) / 2018. 11-24.
 7. Абд, Али Лаит Мохаммед, and Хайдер Абдулсахиб Исса. "Разработка элементов Smart Grid для оптимизации режимов районных сетей." Молодой ученый 8 (2014): 117-120.
 8. Mohmmmed, Haider Ahmed, Layth Mohammed Abd Ali, and Othman M. Hussein Anssari. "Maintaining Electric Power Quality Using Integrated S-Transform with Xenogeneic Composition Neural Network." International Journal of Engineering & Technology 7.3.20 (2018): 538-543.
 10. Abd Ali, Layth & Хайдер Абдулсахиб, Исса. (2014). Использование Ветроэлектростанций В Электроэнергетических Системах.
 11. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohmmmed and Othman M. Hussein Anssari, 2019. Modeling and Simulation of Tidal Energy. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14: 3698-3706.
 12. Abd Ali, Layth & Хайдер Абдулсахиб, Исса. (2016). Разработка элементов Smart Grid для оптимизации режимов районных сетей.
 13. Mihnea Rosu-Hamzescu, Sergiu Oprea, "Practical guide to implementing Solar panel MPPT algorithm," Microchip technology Inc, 2015.
 14. Абд, Али Лаит Мохаммед, and Хайдер Абдулсахиб Исса. "Using tidal energy as a clean energy source to generate electricity." Молодой ученый 11 (2018): 62-69.
 15. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohmmmed and Husam Abdulhusein Wahhab, 2019. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14: 3666-3673.
 16. Ансари О. М., Мохммед Х. А., Абд Али Л. М. Design and Simulation a hybrid generation system through wind turbine and solar energy with a heat engine // Молодой ученый. — 2018. — №38. — С. 11-24. — URL <https://moluch.ru/archive/224/52783/>.
 2. Abd Ali, Layth & Абдулсахиб Исса, Хайдер. (2018). Hybrid power generation using solar and wind energy. 7. 19-26.
 3. Energy Information and Administration, (01.05.2018), <http://www.eia.oec.gov>
 4. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohmmmed and Othman M "Hybrid power generation using solar and wind energy." Молодой ученый 7 (2018): 19-26.
 5. Othman M. Hussein Anssari, Layth Mohammed Abd Ali and Haider Ahmed Mohmmmed, 2019. Geothermal Energy as a Resource of Renewable Energy. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14: 3003-3009.
 6. Abd Ali, Layth & Anssari, Othman. (2018). Design and Simulation a hybrid generation system through wind turbine and solar energy with a heat engine. № 38 (224) / 2018. 11-24.
 7. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohmmmed and Othman M "Разработка элементов Smart Grid for optimizing regional network modes." Young Scientist 8 (2014): 117-120.
 9. Mohmmmed, Haider Ahmed, Layth Mohammed Abd Ali, and Othman M. Hussein Anssari. "Electric Resistance Transformer Using Mainstream Integrated S-Transform with Xenogeneic Composition Neural Network." International Journal of Engineering & Technology 7.3.20 (2018): 538-543.
 10. Abd Ali, Layth & Hyder Abdulsahib, Issa. (2014). Use of Wind Power Plants In Electric Power Systems.
 11. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohmmmed and Othman M. Hussein Anssari, 2019. Modeling and Simulation of Tidal Energy. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14: 3698-3706.
 12. Abd Ali, Layth & Hyder Abdulsahib, Issa. (2016). Development of elements of the Smart Grid to optimize the modes of regional networks.
 13. Mihnea Rosu-Hamzescu, Sergiu Oprea, "MPPT algorithm," Microchip technology Inc., 2015.
 14. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohmmmed and Othman M " Young Scientist 11 (2018): 62-69.
 15. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohmmmed and Husam Abdulhusein Wahhab, 2019. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14: 3666-3673.
 16. Ansari O. M., Mokhmed Kh.A., Abd Ali L. M. Designer and Simulation for a heat engine // Young Scientist. - 2018. - №38. - Pp.11-24.-URL <https://moluch.ru/archive/224/52783/>.

references

1. Joanne Hui, Alireza Bakhshai, and Praveen K. Jain,

УДК 621.316

Использование солнечной генерации в системе электроснабжения Ирака

А.Г. Аль Баирмани¹, Б.А. Якимович², В.В. Кувшинов³

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹Eng.alberman@gmail.com, ²yakimovich52@gmail.com,
³kuvshinov.vladimir@gmail.com

Статья поступила 29.04.2019 г.; после доработки 06.05.2019 г.

Аннотация

В работе на основе расчетных исследований выполнена оценка эффективности применения распределенных солнечных электростанций для повышения пропускной способности и обеспечения требуемого качества напряжения в сетях 0,4 – 11 кВ Ирака. Показано, что, исходя из географического и климатического положения Ирака применение таких электростанций, в особенности в отдаленных районах республики Ирак позволяет значительно расширить отпуск электроэнергии населению, особенно в распределительных сетях 0,4 кВ.

Ключевые слова: системы электроснабжения Ирака, солнечная генерация, фотовольтаика, установившийся режим, качество электроэнергии.

Use of solar generation in the distribution system of Iraq

A.G. Albairmani¹, B.A. Yakimovich², V.V. Kuvshinov³

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹Eng.alberman@gmail.com, ²yakimovich52@gmail.com, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com

Received 29.04.2019 y.; received in final form 06.05.2019 y. _____

Abstract

In the work, on the basis of computational studies, an assessment was made of the effectiveness of using distributed solar power plants to increase capacity and ensure the required quality of voltage in 0.4 - 11 kV networks in Iraq. It is shown that, based on the geographical and climatic situation of Iraq, the use of such power plants, especially in remote areas of the Republic of Iraq, can significantly expand the supply of electricity to the population, especially in 0.4 kV distribution networks.

Keywords: power supply systems of Iraq, solar generation, photovoltaics, steady state, power quality.

Введение

Электрическая энергия основа высокого уровня жизни, развитой экономики и национальной безопасности любого государства. Энергетические проблемы затронули и республику Ирак.

Страна известна как экспортер нефти. Климат Ирака характеризуется жарким и продолжительным летом, число часов солнечного сияния превышает 2,5 тыс. часов на севере страны, 3 тыс. часов в центральных районах и почти 3,5 тыс. часов на юге.

В настоящее время различают 2 наиболее популярный способа преобразования солнечной энергии: фотовольтаика и гелиотермальная энергетика. Фотовольтаическая система - уникальный вид получения электричества, посредством попадания солнечного света на панели. Принцип выработки электричества основан на фотовольтаическом эффекте, когда при пробивание светом поверхности вещества, электроны начинают перемещаться между анодом и катодом внутри панели.

Обычно панели состоят из нескольких слоёв полупроводниковых материалов. Чем больше концентрация света, тем больше выработка электричества.

Данный вид выработки электричества достаточно широко применяется в автономной системе энергоснабжения на основании солнечных батарей [1, с. 61].

Из новых разработок в области солнечной энергетики можно выделить производство солнечных батарей на основе полупроводниковых гетероструктур. Их производство началось в 2016 году. Разработчики обещают, что КПД таких панелей будет в два раза выше существующих, а стоимость — в два раза меньше статистических батарей на рынке.

Во время войны в Ираке были существенно повреждены сети 11 и 0,4 кВ по которым в основном получает электроэнергию сельское население страны. Получение электроэнергии на основе современных солнечных батарей и их использование в инфраструктуре сохранившихся распределительных сетей 0,4 и 11 кВ позволило бы без существенной модернизации этих сетей или строительства новых обеспечить население страны в сельских районах электроэнергией.

Такой подход требует проведения расчетных исследований установившихся режимов сетей 11 и 0,4 кВ для сравнения эффективности применения источников солнечной генерации на основе расчетов установившихся режимов в сетях 10 и 0,4 кВ и оценки повышения пропускной способности распределительных сетей 0,4 и 11 кВ после установки таких источников.

Для распределительных сетей Ирака характерно наличие большого количества радиальных сетей сельского назначения, имеющих значительные длины воздушных линий электропередачи 11 и 0,4 кВ с большим количеством отпавших линий к отдельным сельскохозяйственным потребителям.

Электрическая нагрузка потребителей невелика и составляет от единиц до десятков кВт.

После окончания военных действий, наблюдается интенсивный спрос на электроэнергию, вызванный возрождением экономики сельских районов Ирака. Оставшаяся, не уничтоженная в период войны, инфраструктура распределительных сетей Ирака не в состоянии в полной мере обеспечить возросший спрос на электроэнергию из-за недостаточной пропускной способности. Падение напряжения в конце линий 0,4 – 11 кВ достигает 15 – 20 %, а потери нередко превышают 30 % от передаваемой активной мощности [2, с.13].

В этих условиях возможны такие варианты решения этой проблемы: 1) строительство новых или полная реконструкция существующих распределительных сетей; 2) дополнить существующие распределительные сети небольшими источниками распределенной генерации на основе солнечной генерации.

Первый вариант связан со значительными инвестициями в инфраструктуру сетей и в условиях сложившейся экономической ситуации в Ираке в ближайшей перспективе не может быть реализован.

Рассмотрим возможности реализации второго варианта развития распределительных сетей 11 и 0,4 кВ Ирака, на примере таких сетей в провинции Багдад и оценим его конкурентоспособность по сравнению с новым строительством.

Учитывая климатические особенности страны, перечисленные выше, солнечные электростанции на фотоэлектрических преобразователях (СЭС) будут наиболее предпочтительными поскольку их установка практически не зависит от местоположения той или иной провинцией Ирака [2, с.14].

Эти СЭС могут составить основной класс источников распределенной генерации, которые подключаются на напряжение 0,4 кВ или 11 кВ, устанавливаются в местах потребления, например, в отдельных домах или даже в квартирах [3, с. 28]. Такой класс источников распределенной генерации, рассмотренный в [4] был использован для расчетного исследования их влияния на режимы работы распределительных сетей 0,4 и 11 кВ Ирака в провинции Багдад.

Установка СЭС в распределительной сети 0.4 Кв

Для анализа влияния распределенной генерации солнечных электростанций выбран участок распределительной сети 0.4 кВ в провинции Багдад. Схема сети показана на Рис. 1.

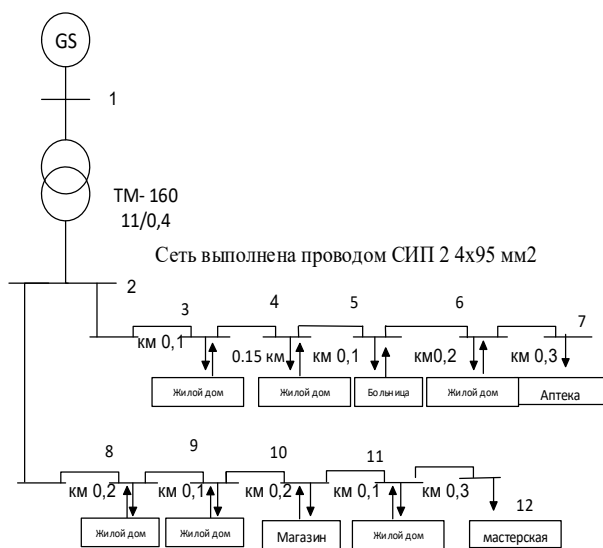


Рис. 1. Схема распределительной сети 0,4 кВ

Потребители жилого массива получают питание по 2-м магистральным линиям (2-7 и 2-12) от трансформаторной подстанции (узел 2), в которой установлен один трансформатор ТМ 160 11/0,4. Паспортные данные трансформатора следующие: номинальная мощность $S = 160$ кВА; напряжения (высокое - 11 кВ, низкое - 0,4 кВ), потери короткого замыкания 2,9 кВт, потери холостого хода 0,35 кВт, ток холостого хода 1,1%, напряжение короткого замыкания 4,5%. Обе магистральные линии 4-х проводные, выполнены самонесущим изолированным проводом СИП 2 сечением 95 мм², погонные сопротивления провода: $r_0 = 0.411$ Ом/км, $x_0 = 0.0656$ Ом/км. Расстояния между потребителями указаны на Рис. 1, а их расчетные мощности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные мощности потребителей

Потребитель	Номер на схеме	P, кВт	Q, квар
Жилой дом		8	2,8
Жилой дом		8	2,8
Больница		35,2	19
Жилой дом		8	2,8
Аптека		8	2,8
Жилой дом		8	2,8
Жилой дом		8	2,8
Магазин		15	7,3
Жилой дом		8	2,8
Мастерская		28	13,9

На основании паспортных данных элементов сети и нагрузок потребителей подготовлена расчетная схема замещения для компьютерной программы расчета установившихся режимов RS-3 [5]. Расчет показал, что установившийся режим характеризуется низкими уровнями напряжений у потребителей, на обеих линиях начиная от их середин до концов. Например, на концах линий в узле 7 напряжение ниже номинального на 11,9%, а в узле на 18,4%. Потери активной мощности в элементах сети составили 19,5 кВт, или 14,5% от мощности всех потребителей.

Используя программный комплекс PVsyst, разработанной Group of Energy Institute of Sciences of Environment University of Geneva [6] на основе географической широты и долготы распределительной сети выбрана мощность в 2 кВт у СЭС, устанавливаемых у всех потребителей.

Расчет установившегося режима в распределительной сети 0,4 кВ с учетом установленной распределенной генерации СЭС показал, что значительно улучшились все параметры установившегося режима. Напряжения во всех узлах сети повысились на 3 – 5%, а потери активной мощности в элементах сети составили 14,19 кВт, т.е. снизились на 18,8% против исходных. Следовательно, и пропускная способность линий так же повысилась минимум на эту величину, что позволяет судить об эффективности применения СЭС в сети 0,4 кВ.

Установка СЭС в распределительной сети 11 кВ

Для анализа влияния распределенной генерации СЭС выбран участок распределительной сети 11 кВ в той же провинции Багдад. Схема сети показана на Рис. 2.

Потребители городского района получают питание по 2-м магистральным воздушным линиям от районной подстанции 33/11 кВ (узел 1), на которой установлен один трансформатор ТМ 1600 33/11. Паспортные данные трансформатора: номинальная мощность $S = 1600$ кВА; номинальные напряжения (высокое 33 кВ, низкое 11 кВ), потери короткого замыкания 18,5 кВт, напряжение короткого замыкания 6,5%, потери холостого хода 2,75 кВт, ток холостого хода 1,73%. Обе магистральные линии 3-х проводные выполнены самонесущим изолированным проводом СИП 3 сечением 35 мм², погонные сопротивления провода: $r_0 = 0,98$ Ом/км, $x_0 = 0,32$ Ом/км. Расстояния между потребителями

указаны на Рис. 2, а расчетные мощности потребителей приведены в табл. 2.

По паспортным данным элементов сети и нагрузках потребителей составлена расчетная схема замещения и выполнен расчет исходного установившегося режима сети 11 кВ. В исходном режиме достаточно низкие уровни напряжений у потребителей, в особенности в узлах 5, 6 и 8 в конце обеих магистральных линии электропередачи. Потери активной мощности в элементах сети составили 55,84 кВт или 3,45% от активной мощности потребителей.

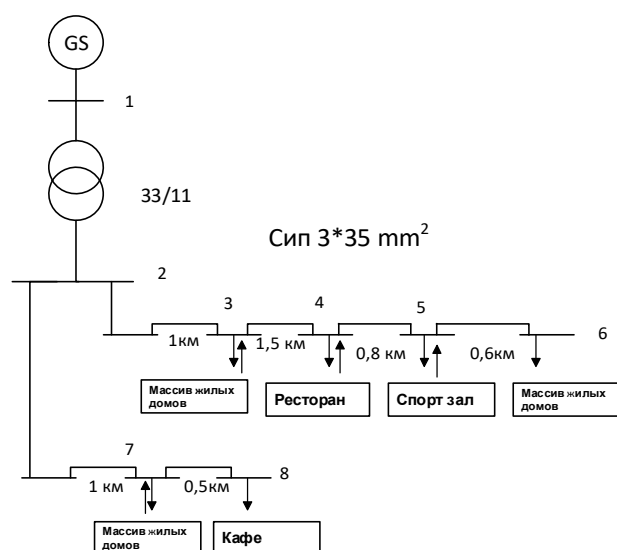


Рис. 2. Схема распределительной сети 11 кВ.

Таблица 2. Расчетные мощности потребителей

Потребитель	Номер на схеме	P, кВт	Q, квар
Массив жилых домов	3	437,4	250
Ресторан	4	486	270
Спортивный зал	5	81	39
Массив жилых домов	6	129,6	63
Массив жилых домов	7	259,2	126
Кафе и магазины	8	226,8	109,8

В сети 11 кВ СЭС экономически нецелесообразно устанавливать у всех потребителей, т.к. они должны иметь значительно большую мощность чтобы оказывать заметное влияние на режимы работы сети [7, с.73]. Ограничимся

установкой 3-х СЭС активной мощностью по 40 кВт в узлах с наименьшими уровнями напряжений (5, 6 и 8).

Результаты расчета показывают, что применение распределенных СЭС незначительно увеличило напряжения в узлах сети, они изменились лишь на десятые доли процента. Это указывает на то, что в сети 11 кВ для регулирования уровней напряжения следует использовать иные средства, например, батареи статических конденсаторов или трансформаторы с регулируемыми коэффициенты трансформации. Однако установка распределенных СЭС существенно повлияла на потери активной мощности в элементах сети, которые в этом установившемся режиме после установки СЭС составили 50,98 кВт против 55,84 кВт в исходном режиме, т.е. снизились на 8,7 %.

Выводы

В результате проведенных расчетных исследований показано, что для распределительных сетей Ирака наиболее целесообразно устанавливать СЭС в сетях 0,4 кВ. В сетях 11 кВ применение СЭС связано с их значительным укрупнением и увеличением капиталовложений, а повышение пропускной способности этих сетей после установки СЭС практически не происходит.

Список литературы

1. Бубенчиков А.А., Нурахмет Е.Е., Молодых В.О., Руденок А.И. Солнечная энергия как источник электрической энергии. Международный научно-исследовательский журнал. 2016, № 5(47), 59–62.
2. Аль Зухаири Али Мохаммед, Виноградов А.А. Типы и виды использования (FACTS) для повышения пропускной способности ЛЭП электрической системы. В сб. «От плана ГОЭЛРО к энергетике будущего» - Изд-во Московского государственного открытого университета им. В.С. Черномырдина, 19 декабря 2012 г. с. 12-15.
3. Лыкин А.В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013, 115 с.
4. للعرب الكهرباء يخص ما كل و الكهرباء URL: <http://كهرباءالعرب.com>. [Электронный ресурс], дата обращения 15.04.19.
5. Программа установившегося режима электрической системы (RS-3), зарегистрирована в государственном реестре регистрации программ для ЭВМ России, свидетельство № 2013613725. Авторы: А.А. Виноградов, Г.С. Середин. 2013 г.

6. PVsyst presents results in the form of a full report, specific graphs and tables, and data can be exported for use in other software. URL: <https://www.pvsyst.com> [Электронный ресурс], дата обращения 12.03.15.
7. Крайнов А.В. Системы энергоснабжения горной промышленности: учебник / Крайнов А.В., Пашков Е.Н. — Томск: Томский политехнический университет, 2014. — 167 с.

References

1. Bubenchikov A.A., Nurakhmet E.E., Molodykh V.O., Rudenok A.I. Solar energy as a source of electrical energy. International Research Journal. 2016, No. 5 (47), 59–62.
2. Al Zuhairi Ali Mohammed, A. Vinogradov Types and uses (FACTS) to increase the capacity of power lines of the electrical system. On Sat “From the GOELRO plan to the energy of the future” - Publishing House of the Moscow State Open University. Vs Chernomyrdin, December 19, 2012 with. 12-15.
3. Lykin A.V. Energy saving and increase of energy efficiency in electrical networks. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2013, 115 p.
4. للعرب الكهرباء يخص ما كل و الكهرباء URL: <http://كهرباءالعرب.com> [Electronic resource], date of appeal 15.04.19.
5. The program of the steady state electrical system (RS-3), is registered in the state register of registration of computer programs in Russia, certificate No. 2013613725. Authors: A.A. Vinogradov, G.S. The middle. 2013
6. It can be shown in the form of a report. URL: <https://www.pvsyst.com> [Electronic resource], appeal date 12.03.15.
7. Krainov A.V. Energy Supply Systems of Mining Industry: textbook / Krainov A.V., Pashkov E.N. — Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2014. - 167 p.

УДК 620.92

Электроэнергии в Ираке: кризис и решение

Ф.М. Аль-Руфай¹, Л.М. Абдали², В.В. Кувшинов³*ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹fa99ez@mail.ru, ²laith_2210@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com*

Статья поступила 13.05.2019 г.; после доработки 16.05.2019 г.

Аннотация

В ходе работы указан потенциал Иракской энергетики в отношении возобновляемых источников, где благодаря равномерному распределению солнечного излучения по всей территории страны, солнечные фотоэлектрические технологии подходят для производства электроэнергии по всему Ираку. По результатам работы выявлено, что полученный результат применим не только к энергосистеме Республики Ирак, но и к другим зарубежным энергосистемам Ближнего Востока с большим количеством источников возобновляемой энергии и потенциального строительства новых солнечных электрических станций, что позволит в частности оптимизировать управление энергосистемой.

Ключевые слова: Возобновляемая энергия, солнечная энергия, фотоэлектрические технологии, солнечные электростанции, Ближний Восток, Производство электроэнергии

Electricity in Iraq: Crisis and Solution

F.M. Al-Rufae¹, L.M. Abdali², V.V. Kuvshinov³*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹fa99ez@mail.ru, ²laith_2210@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com*

Received 13.05.2019 y.; received in final form 16.05.2019 y.

Abstract

The work identified the potential of Iraqi energy for renewable sources, where solar photovoltaic technologies are suitable for the production of electricity throughout Iraq due to the uniform distribution of solar radiation throughout the country. The results of the work revealed that the result is applicable not only to the power system of the Republic of Iraq but also to other foreign power systems of the Middle East with a large number of renewable energy sources and the potential construction of new solar power plants, that can make it possible to optimize the power system management.

Keywords: Renewable energy, solar energy, photovoltaic technologies, solar power plants, the Middle East, Electricity Generation

Введение

Энергетические проблемы — одни из важнейших мировых проблем современности, они затрагивают самым непосредственным образом многие страны. Недостаточность производства электроэнергии, ее дороговизна сдерживают не только создание промышленности и перерабатывающих отраслей, но и социальное развитие.

Основу локальной энергетики Ираке составляют дизель генераторы (ДГ) и дизельные электростанции (ДЭС) на их основе. Как источ-

ники электроэнергии автономных систем электроснабжения они обладают очевидными достоинствами и известными недостатками, к главным из которых относятся большой расход органического топлива на выработку одного кВт·ч электроэнергии и загрязнение окружающей среды. В тоже время полноценной замены им нет. Серьезной проблемой изолированных от центральных энергосистем потребителей является дальний и дорогостоящий транспорт топлива, ограниченный сроками сезонного завоза, что является одной из главных причин сниже-

ния надежности электроснабжения[1].

На перспективы развития энергетики Ирака влияют, в основном, факторы собственной обеспеченности энергоресурсами Страна известна как экспортер нефти а информация последних месяцев о разведывании в ее западных районах новых богатых месторождений существенно повышает ее шансы на быстрое возрождение. В этих условиях может показаться, что путь решения энергетических проблем вполне ясен, есть все основания опираться на собственные запасы нефти. Однако такой путь был бы неправилен Во-первых, расширение использования нефти усугубляет экологические проблемы. Во-вторых, политические события последних лет показали, что нефтяные месторождения не могут являться гарантией надежного энергоснабжения, и ориентация только на них ставит под угрозу безопасность страны. Необходимые темпы потребления энергоресурсов в Ираке вполне могут быть обеспечены широким использованием экологически чистых возобновляемых энергоисточников.

Преобладающее кризис

Дефицит электроэнергии остается одной из самых больших проблем для Ирака и ключевым компонентом следующий правительственный план социально-экономического развития и программы реконструкции после войны с ISIS (2014-2017). Протесты вспыхнули прошлым летом во многих южных провинциях, включая Басру, осуждая безудержную коррупцию, отсутствие основных услуг, включая питьевую воду и электрицию.

Правительство пообещало, но неустанно не удалось решить проблему нехватки электроэнергии, несмотря на расходы более 40 миллиардов долларов с 2003 года. Отсутствие четкой политики и бесхозяйственность усугубила проблему, увеличив разрыв между спросом и предложением, превратив дефицит электроэнергии в эндемический кризис. В 2012 году интегрированная Национальная энергетическая стратегия (INES) оценила стоимость отключений электроэнергии в США 40 миллиардов долларов в год, в то время как некоторые оценивают потери до \$ 55 млрд в год потенциальной выручки из-за нехватки электроэнергии и топлива. Рекомендации INES и многочисленные другие призывы многих экспертов и международных. такие учреждения, как Всемирный банк, для реформирования сектора ушли незаметно для правительства за последние 15 лет [2,3].

Кризис усугубляется тем, что с 2003 года потребление электроэнергии в Ираке ежегодно растет средними темпами роста на уровне 6-7 процентов. Рост потребления электроэнергии объясняется главным образом увеличением численности населения и повышением экстремальных температур выше 50 градусов Цельсия в летние жаркие дни.

Нет точной оценки пикового спроса по всей стране, но многие считают, что он колеблется между 25,000 – 30,000 МВт летом 2018, в то время как центральная генерирующая мощность колебалась вокруг 15,000 МВт (Рисунок 1). Ожидается, что текущий дефицит спроса-предложения достигнет 20 000 МВт к 2022 году, в то время как общий пиковый спрос, вероятно, достиг к 2030 году где-то от 50 000 до 60 000 МВт, поскольку ожидается, что рост потребления электроэнергии в течение следующих пяти лет восстановится, как только Ирак будет стремиться перейти в не зависящую от нефти экономику [2,3].

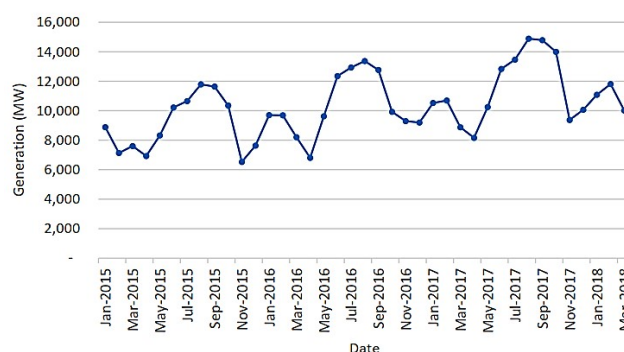


Рис. 1. Производство электроэнергии в Ираке [2]

Расчетное потребление электроэнергии на душу населения в Ираке составляет около 1300 кВт*ч в год. Это далеко ниже, чем соседние страны (Таблица 1), и не отражает фактический спрос, который мог бы достигать 3 – 4 раза превышает текущий уровень потребления.

Таблица 1. Среднее потребление электроэнергии в Ираке на душу населения в год (2016 г.)

COUNTRY	AVERAGE ELECTRICITY CONSUMPTION PER CAPITA (KWH PER PERSON PER YEAR)
IRAQ	1,306 (2014)
JORDAN	1,954
TURKEY	2,578
IRAN	2,632
SAUDI ARABIA	9,658
KUWAIT	19,062
WORLD (AVERAGE)	3,127

Чрезмерная зависимость Ирака от сжигания ископаемых видов топлива для производства электроэнергии (Рисунок 2) привела к возникновению ряда экологических проблем и возложила на Министерство нефти тяжелое бремя по удовлетворению растущего спроса. Обеспечение поставок природного газа для поддержания производства электроэнергии на текущем уровне.

Не может продолжаться из-за отсутствия прямых иностранных инвестиций в газовые запасы страны. По оценкам ОВОС, к 2035 году Ираку необходимо установить около 70 гига-ватт генерирующих мощностей и перейти от преимущественно нефтяного энергоблока к более эффективному использованию газовых генераций. Без этого перехода Ирак отказался бы от поступлений от экспорта нефти на сумму около 520 млрд. долл. США, а внутренний спрос на нефть был бы более чем на миллион баррелей в день выше в 2035 году. Следовательно, решение проблемы потребности в электроэнергии имеет первостепенное значение для будущего правительства, чтобы исправить нарушенные экономики, который мог бы служить связующим мостом между экономиками государств Персидского залива и Европы. В этом контексте надежное электроснабжение имеет центральное значение для поддержки экономических целей Ирака по обеспечению роста в ненефтяных секторах.

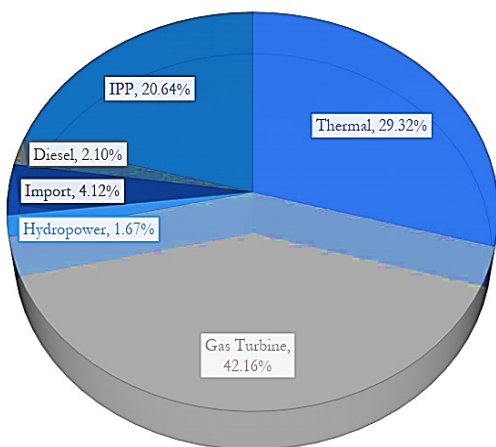


Рис. 2 - Состав генерации Ирака в 2018 году (Источник: Министерство электричества)

Возобновляемые энергии на Ближнем Востоке

Развивается быстрыми темпами. Саудовская Аравия, крупнейший производитель нефти

в мире, приняла агрессивную цель 9,5 ГВт возобновляемых источников энергии к 2023 году и подписала меморандум о взаимопонимании с японским многонациональным инвестиционным банком, чтобы построить 200 ГВт солнечной энергии к 2030 году стоимостью \$200 миллиард 7.

Если эта солнечная электростанция будет построена, она будет примерно в 200 раз больше самой большой солнечной электростанции в мире. Саудовский акцент на развитие возобновляемых источников энергии является частью плана по избавлению экономики от нефтяной зависимости.

Преимущества были признаны другими странами региона, а также путем реализации агрессивных программ возобновляемых источников энергии, в том числе в Объединенных Арабских Эмиратах, которые установили целевой показатель чистой энергии 7 процентов к 2020 году и 30 процентов к 2030 году. Дубайское Управление по электроснабжению и водоснабжению (DEWA) заключило контракт на осуществление трех этапов проектов солнечной фотоэлектрической энергии (PV), последний из которых имеет номинальную мощность 800 МВт. Абу-Даби начато строительство 1.17 ГВт солнечной фотоэлектрической фермы. Кувейт поставил перед собой цель к 2030 году обеспечить 15% производства энергии за счет возобновляемых источников энергии, что примерно эквивалентно 4,5 ГВт производства электроэнергии. Другие страны, такие как Египет, Марокко, Иордания и Оман, также осуществили значительные программы использования возобновляемых источников энергии[4].

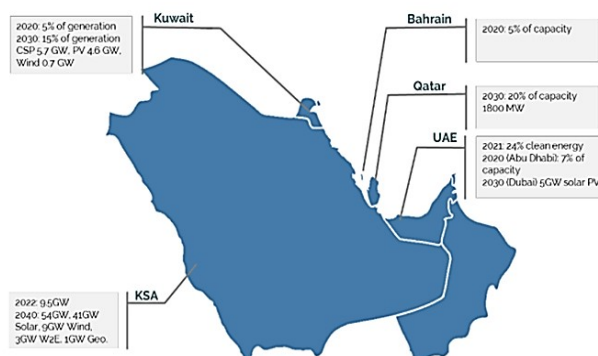


Рис. 3. Государства ССЗ План Использование Возобновляемых Источников Энергии [5]

Однако Ирак по-прежнему отстает от своих региональных коллег в осуществлении инициа-

тив по использованию возобновляемые источники энергии для производства электроэнергии (Рисунок 3)[5]. В то время как Ирак приступил к использованию тарифного подхода, государства-члены ССЗ сделали выбор в пользу финансируемого на международном уровне подхода ПГЧС с использованием потенциала, энергии и предполагаемых энергетических структур. Тем не менее, Ирак стремится к развитию альтернативных источников энергии для обеспечения устойчивого роста в среднесрочной перспективе.

Постановка задачи исследования

Климат в Ираке

Ирак — государство на Ближнем Востоке, в Месопотамской низменности, в долине рек Тигр и Евфрат. Граничит на юго-востоке с Кувейтом, на юге с Саудовской Аравией, на западе с Иорданией и Сирией, на севере с Турцией, и Ираном на востоке, между широтами $29^{\circ} 5' N$ и $37^{\circ} 22' N$ северной широты и $38^{\circ} 45' E$ и $48^{\circ} 45' E$ восточной долготы рис. 4. Территория Ирака омывается водами Персидского (Арабского) залива на юго-востоке страны. [6]

Климат Ирака характеризуется прежде всего крайне знойным летом и умеренными зимой: самые высокие значения температуры в июне, июле и августе между $43^{\circ} C$ и $50^{\circ} C$ в середине дня, термометр в тени показывает до $50^{\circ} C$ с июня по сентябрь как на севере, так и на юге страны. При всем этом наблюдается полнейшая сушь, и только на севере (Мосул) ночи приносят кое-какую прохладу.



Рис. 4. Карта Ирака

Потенциал Солнечной Энергии Ирака

Энергетический профиль Ирака по-прежнему характеризуется общими для периода до 2003 года тенденциями.

Кроме как гидроэнергетика, вклад возобновляемых источников энергии незначителен, без четких шагов, чтобы использовать его предусматриваются возобновляемые ресурсы.

Ирак имеет богатый потенциал солнечной энергии с большим количеством солнечного света в течение всего года, как он лежит в глобальном Солнечном поясе (Рисунок 4). Каждые неиспользуемые 100 км^2 западной и Южная пустыня имеет потенциал произвести энергию эквивалентно 30 млн. тонн нефтяного эквивалента (МТНЭ) в год с помощью фотоэлектрических панелей.

Это делает Ирак идеальное место для инвестиций в солнечную энергию и может быть долгосрочным решением для электроэнергии дефицит. Потенциал солнечной энергии оценивается примерно в 3,4 млрд кВтч в год, эквивалентно общей мощности 5,9 ГВт. Этот соответствует площади приблизительно 10 квадратных километры солнечных батарей на эффективность 16 процентов.

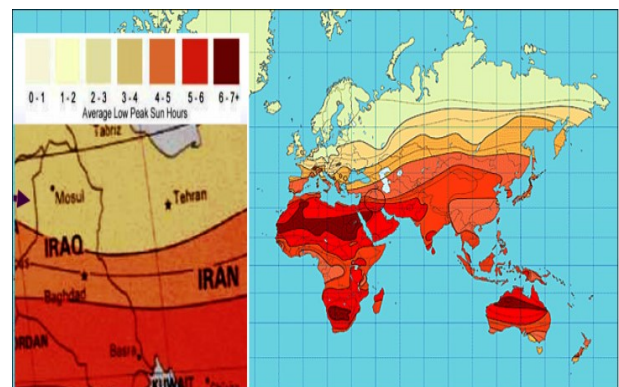


Рис. 5. Ежедневная усредненная солнечная инсоляция Ирака ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$)[7].

Солнечная энергия может широко использоваться на двух третях территории Ирака.

В западных и южных районах продолжительность солнечного излучения составляет от 2800 до 3000 часов в год более $6,5 - 7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ горизонтальная излучения в день (рис. 5).

Это делает оба региона чрезвычайно благоприятными для инвестиций в строительство солнечных электростанций[2, 6].

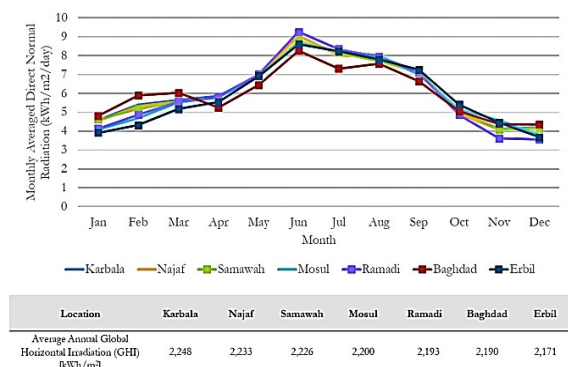


Рис. 6. Среднее прямое нормальное излучение для разных мест

Результаты исследования

Жизнеспособность данных о солнечном излучении имеет жизненно важное значение для экономного использования солнечной энергии. Измерение данных о солнечной энергии во всех районах Ирака имеет важное значение для оценки преимуществ использования солнечной энергетики в Ираке. Рис. 5 показывает карту распределения солнечного излучения Ирака [7]. В рисунок 6 представлено сравнение солнечной инсоляции для некоторых городов в Ираке. Из данных, представленных в рисунке 5 и 6, все указанные города в Ираке, очевидно, имеют высокое солнечное излучение.

Основные характеристики солнечного излучения

Основные характеристики солнечного излучения в Ираке можно резюмировать следующим образом:

- Солнечная инсоляция сильно снижается с севера на юг и увеличивается зимой и уменьшается летом. Летом (с июня по август) на иракских территориях наблюдается гораздо более равномерное распределение солнечного излучения.
- Спад солнечной энергии с востока на запад считается небольшим с некоторыми оценочными погрешностями.
- Оценка солнечной инсоляции зависит от взаимосвязей, полученных на основе данных, которые были измерены метеорологическими станциями в мелких и крупных городах. Эти места получают меньше излучения, чем окружающие зоны из-за загрязнения, таким образом, фактические уровни излучения выше, чем измеренные значения.
- Благодаря равномерному распределению солнечного излучения по всему Ираку,

солнечные фотоэлектрические технологии подходят для производства электроэнергии по всему Ираку.

- Солнечная фотоэлектрическая технология, также соответствует для автономного производства электроэнергии на электростанциях в сельских пустынных районах.

Выводы

- Электроэнергетика Ирака должна ориентироваться на широкое использование ВИЭ, это будет соответствовать основным тенденциям развития мировой энергетики и сохранению экологической ситуации в стране, а также обеспечит ее экономическую безопасность
- Для разработки государственной программы развития электроэнергетики Ирака, ориентирующейся на использование экологически чистых ВИЭ, необходимо выполнить дополнительные изыскания, направленные на уточнение региональных энергетических потенциалов и потребностей местных, несистемных потребителей
- В решении энергетических проблем, связанных с использованием ВИЭ, целесообразно объединение ближневосточных арабских стран, имеющих сходные как природные условия, так и социальноэкономические тенденции развития
- Плотность солнечной энергии в Ираке является одной из самых высоких в мире.
- Ирак расположен вблизи экваториального (солнечного) пояса, что дает Ираку необходимые природные условия для использования солнечной энергии.
- Продолжительность солнечного сияния составляет от 2800 до 3000 часов в год при горизонтальном излучении более 6,5-7 кВтч / м² в день. Это делает регион чрезвычайно благоприятным для инвестиций в строительство солнечных электростанций.

Основная проблема в распространении солнечной энергетики заключается в двух основных моментах: во-первых, низкая осведомленность общественности о сокращении потребления и рациональном использовании электроэнергии, во-вторых: низкая осведомленность общественности и лиц, принимающих решения, о важности использования всех проектов по солнечной энергетике в качестве альтернативы вместо ископаемого топлива. В заключении отметим актуальность и востребованность создания оптимальной модели решающе задачу эф-

фектного управления энергосистемой Республики Ирак и дающей направления для использования потенциала развития солнечных электростанций в энергосистемах на Ближнем Востоке.

Список литературы

1. Кувшинов В.В. Возможности использования энергетических установок на основе возобновляемых источников энергии / В.В. Кувшинов, Н.В. Морозова, И. Ю. Софийский– М.: Издательство (Спутник +), 2017. – 290 с.
2. Harry H. Istepanian, Solar Energy in Iraq: From Outset to Offset, Iraq Energy Institute, 18 October 2018, 25 pp.
3. Istepanian, H. (2014, May). Iraq's Electricity Crisis. The Electricity Journal, 27(4), 51-69
4. Al-Khatteeb, L., & Istepanian, H. (2015). Turn A Light On: Electricity Sector Reform in Iraq. Washington, DC: The Brookings Institution.
5. IRENA. (2016). Renewable Energy Market Analysis: The GCC Region. Abu Dhabi: IRENA.
6. Maan J. B. Solar Energy Applications in Iraq: A Review/ Maan J. B. International Journal of Scientific Engineering and Science, Volume 1, Issue 9, pp. 30-39, 2017.
7. http://www.climatewarmingcentral.com/solar_page.html .

References

1. Kuvshinov V.V. Vozmozhnosti ispol'zovaniya energeticheskikh ustanovok na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii / V.V. Kuvshinov, N.V. Morozova, I. YU. Sofiyskiy– M.: Izdatel'stvo (Sputnik +), 2017. – 290 s.
2. Harry H. Istepanian, Solar Energy in Iraq: From Outset to Offset, Iraq Energy Institute, 18 October 2018, 25 pp.
3. Istepanian, H. (2014, May). Iraq's Electricity Crisis. The Electricity Journal, 27(4), 51-69
4. Al-Khatteeb, L., & Istepanian, H. (2015). Turn A Light On: Electricity Sector Reform in Iraq. Washington, DC: The Brookings Institution.
5. IRENA. (2016). Renewable Energy Market Analysis: The GCC Region. Abu Dhabi: IRENA.
6. Maan J. B. Solar Energy Applications in Iraq: A Review/ Maan J. B. International Journal of Scientific Engineering and Science, Volume 1, Issue 9, pp. 30-39, 2017.
7. http://www.climatewarmingcentral.com/solar_page.html

УДК.502.35

Системные основы оценки уровня устойчивого развития регионов

А.А. Васильев¹, Э.Ю. Ислямова², В.В. Кувшинова³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия.¹alexvas4978@gmail.com, ²evelina.islyamova21@gmail.com, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com

Статья поступила 30.05.2019 г.; после доработки 31.05.2019 г.

Аннотация

Рассматриваются системные основы методики оценки уровня устойчивого развития регионов, для чего проанализированы многочисленные публикации на эту тему. Оценки уровня устойчивого развития дают возможность выявлять источники устойчивости или неустойчивости, виновников и ответственных за плохое состояние окружающей среды, экономики и социальной сферы, устанавливать связи и взаимодействия субъектов и объектов, составлять основу для разработки модели управления.

Различные модели оценок устойчивого развития на основе конкурентных сравнений и процедур будут использоваться и выбираться социумами для повседневной реализации. А проверка практикой будет вносить уточнения в эти представления.

Ключевые слова: устойчивое развитие, оценка, индикаторы, сценарии развития, субъекты, объекты.

System bases for assessing the level of sustainable development of regions

A.A. Vasilyev¹, E.Yu. Islyamova², V.V. Kuvshinova³Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia.¹alexvas4978@gmail.com, ²evelina.islyamova21@gmail.com, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com

Received 30.05.2019 y; received in final form 31.05.2019 y.

Abstract

The system bases of the methodology for assessing the level of sustainable development of regions are considered, for which numerous publications on this topic have been analyzed. Estimates of the level of sustainable development provide an opportunity to identify sources of sustainability or instability, the perpetrators and those responsible for the poor state of the environment, the economy and the social sphere, to establish connections and interactions between subjects and objects, to form the basis for developing a management model.

Different models for assessing sustainable development based on competitive comparisons and procedures will be used and selected by societies for everyday implementation. A practice test will make clarifications to these representations.

Keywords: sustainable development, assessment, indicators, development scenarios, subjects, objects.

Введение

Тема устойчивого развития стала популярной, начиная с 90-х годов XX века после саммита в Рио-де-Жанейро 1992 года.

Одной из важнейших подтем стала оценка уровня устойчивого развития. Обзор вопроса дается во многих работах [1-7].

Оценка необходима для выявления уровня развития регионов, сравнения регионов, плани-

рования будущего, выработки путей эффективного, успешного развития регионов.

Она дает возможность выявлять источники устойчивости или неустойчивости, виновников и ответственных за плохое состояние окружающей среды, экономики и социальной сферы, устанавливать связи и взаимодействия субъектов и объектов, составлять основу для разработки модели управления.

Материалы и методы

Проанализированы публикации, посвященные оценке уровня устойчивого развития различных регионов мира [1-7]. Анализ производился также для Крымского региона [8-11]. Оценки сопоставлялись с социальными, экономическими, экологическими, политическими характеристиками регионов, опросами и оценками жителей регионов. Все многообразие подходов было разделено на следующие основные группы:

- Индикаторный подход, метод. Это наиболее распространенный метод оценки уровня устойчивого развития.
- Использование смешанных оценок, когда сопоставляются явления, процессы, оцениваемые, например, в стоимостной форме.
- Сценарный подход на базе метода системной динамики, когда рассматривается совокупность взаимодействующих явлений.
- Определение параметров устойчивого развития на основе опросов населения. Этот метод дополняет другие, раскрывая особые аспекты проблемы.
- Учет экологических, социальных и экономических императивов. Страна или регион, переступившие определенный порог, автоматически исключаются из списка устойчиво развивающихся стран. Таковы, например, страны, превышающие допустимый экологический след [12].

Результаты и дискуссии

При использовании любого из названных подходов к оценке уровня устойчивого развития необходимо рассматривать ситуации в следующей последовательности: 1) рассмотреть предпосылки развития региона; 2) оценить уровень развития и динамики региона относительно уже установленных норм; 3) оценить реакцию населения региона и его соседей на складывающуюся ситуацию; 4) произвести прогноз развития региона с учетом сложившейся ситуации, желаний социума региона и реальных действий социума, а также соседей (как внутри страны, так и за ее пределами); 5) выявить насколько прогноз будет отличаться от желаемого состояния; 6) предложить систему мер и действий для управления развитием, а точнее – корректировки развития, которое в большой степени является естественно-историческим процессом.

Рассмотрение такой последовательности действий необходимо для того, чтобы, с одной

стороны, увидеть причины и предпосылки складывающейся ситуации (анализ предпосылок), с другой стороны – увидеть реакцию населения и выработать совокупность действий, направленных на корректировку развития региона.

Во всех пяти случаях сложнейшей задачей является выбор первичных показателей и характеристик. Их количество является практически неограниченным. Их выбор производится на основе экспертных оценок, интуиции или учитывая корреляцию с важнейшими установленными факторами. Во многих случаях решающее значение придается мнению авторитетных международных организаций и известных ученых.

Для оценки состояния необходимо также знание норм, выявление которых базируется на знании объективных законов развития природных, социальных и технических систем. Их нахождение часто также связано с мнением авторитетных организаций и личностей.

Субъективизм особенно ярко проявляет себя при использовании индикаторного метода. Фактически его использование связано с методом так называемых балльных оценок. Подходы, используемые в оценках этого типа настолько разнообразны, что в первую десятку стран, успешно двигающихся в сторону устойчивого развития попадают как экономически развитые страны (страны Западного мира), так и развивающиеся страны. Так, например, по величине Всемирного индекса счастья (The Happy Planet Index) [13] — комбинированный показатель британского исследовательского центра New Economic Foundation, который измеряет уровень счастья в странах мира (используются различные показатели, причем весомый вес имеет мнение самих жителей стран) в десятку первых стран попадают Коста-Рика, Мексика, Колумбия, Вануату, Вьетнам, Панама, Никарагуа, Бангладеш, Таиланд, Эквадор.

Но Рейтинг стран мира по уровню счастья Организации Объединенных Наций (World Happiness Report) [14] содержит в первой десятке за 2018 г. Финляндию, Норвегию, Данию, и другие страны западного мира. Сходную картину рисует рейтинг стран мира по уровню процветания, составленный на основе показателей, объединенных в девяти категориях: экономика, предпринимательство, управление, образование, здравоохранение, безопасность, личные свободы, социальный капитал, экология): наиболее высокие рейтинги получили Норвегия, Новая Зеландия, Финляндия и еще ряд стран западного мира.

Характерно, что по всех случаях, когда страны западного блока попадают в первые строки рейтинга, весомое значение имеют такие показатели как ВВП на душу населения и отсутствуют показатели, связанные с их высоким экологическим следом. Конечно же такие методы расчета устойчивого развития не могут вызывать доверие: в последние годы крупнейшими специалистами мира признано, что ВВП как показатель совершенно не годится для обозначенных целей, а высокий экологический след необходимо учитывать, как один из основных негативных показателей.

Если страны вольно выбирают свой набор индикаторов, то вопрос сопоставимости оценок для одной и той же проблемы переходит в область существенной неопределенности. В наборы показателей постоянно вносятся изменения. Это же касается и программы по измерению устойчивого развития с помощью набора индексов и индикаторов, реализуемой комиссией ООН. Такие изменения сводят на нет усилия по определению истинной траектории движения государств в направлении устойчивого развития. С другой стороны, внесение изменений в набор индикаторов неизбежно, поскольку отражает постоянно идущие процессы изучения этой проблемы.

Сложность проблемы связана с взаимодействием самых разных объектов и явлений (природных, социальных, технических, политических и др.), переплетением различных по масштабу пространственных и временных процессов, наличием множества субъектов, у каждого из которых свои критерии. Можно насчитать несколько тысяч характеристик состояния региона. Многие из них выражены разными единицами измерения. Поэтому их объединение сопряжено с большим количеством допущений. При определении предмета обсуждения каждый участник расставляет акценты по-своему: экологи в свою сторону, экономисты и социологи – в свою, а каждое правительство пытается «прочитать» концепцию наиболее выгодным для себя образом.

Это не могло не привести к некоторому «выхолащиванию» понятия, что в совокупности с попытками радикальной математизации и подробного полного учёта, и мониторинга влияющих факторов, породило сложные и абстрактные модели построения критериев устойчивого развития. Такой подход демонстрируют М. З. Згуровский и Г. А. Статюха [15], когда они используют, на первый взгляд, безупречную в математическом отношении методику расчета.

Однако и эта модель получает замечание со стороны П. С. Калиновского с соавторами [10], которые показывают сложности с выбором шкалы при оценке каждого фактора, в частности, как присваивать баллы 0 и 1, использовать ли линейную шкалу или нелинейную и т.д. К тому же величины имеют различные пределы варьирования, например, от 0 до бесконечности, от 0 до 1 и в обе стороны от 0. Это усложняет приведение к единому виду с варьированием от 0 до 1, поскольку для одних показателей используется линейное преобразование, а для других – экспоненциальное.

Известно, что различия в характере варьирования величин при их приведении к единой шкале, вносят систематические погрешности в значения преобразованных величин. Не менее важно отделение показателей, построенных по принципу «от лучшего», когда за условную «1» принимается наивысший показатель по выборке, а остальные нормируются от него.

Еще один фактор, определяющий трудности выбора индикаторов – разномасштабность объектов, явлений и процессов. В биосфере выделяют, как минимум, три пространственных уровня: глобальный (собственно биосферный), региональный и локальный. Нередко их детализируют, то есть появляются 5-6 пространственных уровней. Показатели и индикаторы на каждом уровне имеют свою специфику. Например, закон 60% (впервые сформулированный Г. и Ю. Одумами в 1972 г., а в последствие подтвержденный В. Г. Горшковым, Н. Ф. Реймерсом, К. Доксиадисом и др.) справедлив для планетарного уровня, а также для крупных регионов, но с понижением масштабов территорий становится менее «работающим», а на локальных уровнях вообще теряет смысл.

Аналогичный подход необходим для разграничения временных уровней: по меньшей мере необходимо разграничивать краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные уровни. Действия на каждом уровне имеют свою специфику, и поэтому оптимальные действия на каждом уровне могут вступать в противоречие друг с другом. При сценарном варианте учет временных масштабов является естественным.

Определение уровня устойчивого развития с помощью расчета социально-эколого-экономических индексов. Важно учитывать не только показатели, относящиеся к внутристрановым условиям, но и показатели воздействия регионов и стран на окружающую среду в масштабах всего земного шара. Например, по подсчетам крупнейшего специалиста в области

экологии и экономики Эрнста Вайцзеккера [16], использовавшего соотношение экологического следа и индекс человеческого развития, лишь одна страна (на тот момент – начало 2000 годов) удовлетворяет этим требованиям – это Куба. При некоем, достаточно высоком уровне образования и медицины, приемлемом потреблении и сравнительно невысокой величине экологического следа эта страна попала в зону устойчивого развития, тогда как развитые в экономическом отношении страны имеют слишком высокий экологический след, а подавляющее большинство стран Африки и многие страны Азии и Латинской Америки – недостаточный индекс человеческого развития.

Однако существует другой, более совершенный по мнению многих специалистов, способ расчета воздействия страны и региона на окружающую среду – с помощью биоемкостной модели. По этой модели используется соотношение величины экологического следа и биоемкости, то есть площади биологически продуктивной территории/акватории (пахотных земель, пастбищ, лесов и рыбопромысловых зон), которая может использоваться для удовлетворения потребностей людей. В случае превышения биоемкости по сравнению с экологическим следом страна (регион) относится к кредиторам или спонсорам, если экологический след выше биоемкости, страна попадает в разряд экологических должников [12]. Ю. Н. Елдышев [17] приводит мнение австралийских исследователей из Университета Аделаиды в статье, недавно опубликованной в интернет-журнале «PLOS ONE», которые попытались определить, какие страны оказывают наибольшее негативное влияние на состояние окружающей среды как на своей территории, так и в масштабах всей планеты. Составляя такой рейтинг, ученые ориентировались прежде всего на следующие параметры: истребление лесов, разрушение существующих экологических ниш, чрезмерный вылов рыбы, использование химических удобрений и выбросы парниковых газов. Исследователи выбрали именно эти критерии потому, что по каждому из них существует достаточно полная и доступная статистика для большинства стран. По итогам анализа авторы составили два списка стран. В первый попали государства, наихудшим образом обращающиеся со своими ресурсами, а во второй — страны, воздействие которых на окружающую среду больше всего вредит планете в целом. В первом списке первые десять мест (из 179) достались Сингапуру, Корее, Катару, Кувейту, Японии, Таиланду, Бахрейну,

Малайзии, Филиппинам и Нидерландам. В первой десятке второго списка, в котором значится 171 страна, места (в порядке убывания вреда) распределились так: Бразилия, США, Китай, Индонезия, Япония, Мексика, Индия, Россия, Австралия и Перу.

В этом случае уровень устойчивого развития оценивают по нескольким важным показателям и индексам, имеющим социальный, экономический и экологический смысл. Например, ВВП на душу населения – непригодный для прямой оценки, можно корректировать поправками. Более правильным показателем эффективности экономики стран и регионов предлагается рассматривать экологически адаптированный чистый внутренний продукт (ЭЧВП). Для его расчета необходимо из валового внутреннего продукта вычесть величины основного капитала, потребленного в производстве, истощения природных ресурсов и экологического ущерба [7].

В последние 20-30 лет оценки устойчивого развития стали производиться на базе теории природного капитала. В этом случае система информации по устойчивому развитию должна быть нацелена на измерение различных запасов природных ресурсов и отдельных экосистем, представляющих собой источник потоков материалов и услуг. В схемах Д. И. Люри [18] используется понятие эффективность ресурсопользования, под которым понимается отношение объемов ресурсопользования (т.е. всего количества используемых обществом ресурсов — природных и техногенных) к общим затратам (на добычу и регенерацию). Чем выше эффективность, тем дешевле для общества каждая единица ресурса, тем больше остается людям для личного и общественного потребления.

Сценарные анализы развития регионов (в том числе с помощью метода системной динамики). Такой подход впервые был предложен Дж. Форрестером в конце 60-х годов XX века в виде метода системной динамики. Наибольшую известность этот метод получил после публикации книги «Пределы роста» в 1972 году (авторы Донелла Медоуз и др.). Сценарный вариант позволяет приблизиться к реалиям динамических процессов, имитировать развитие региона, вводя новые факторы, изменяя воздействия.

Для крымских условий сценарный вариант анализа устойчивого развития развивает профессор И. Е. Тимченко [9, 19]. Он усовершенствовал метод системной динамики посредством непрерывного учета получаемых результатов расчетов. Принцип адаптивного баланса

влияний выражает собой идею динамического равновесия сложной социальной эколого-экономической системы территории с приложенными к ней внешними влияниями (управлениями). С его помощью устанавливается система причинно-следственных связей между процессами развития территории и управляющими воздействиями. Такая модель позволяет прогнозировать сценарии развития при различных вариантах управления, что дает возможность выбора рациональных административных решений по использованию природных, экономических и институциональных ресурсов развития. Развитие территории рассматривается как непрерывное движение к краткосрочным и долгосрочным целям развития, постоянно уточняемым за счет сбора и анализа текущей информации о состоянии социальной эколого-экономической системы территории и использования ресурсов развития для достижения поставленных целей.

Наряду с учетом разных блоков необходимо обратить внимание на ряд других важных моментов, которые нужны для получения итоговой картины.

Полисубъектность пространства устойчивого развития. Любая характеристика приобретает смысл лишь в определенной системе оценок, осуществляемых субъектом. Вне субъекта ни одна из характеристик биосферы, окружающей среды или иной объемлющей системы не может выступать индикатором ситуации. По умолчанию чаще всего субъектом (главным субъектом) принимается человек, понимаемый как общество или человечество (то есть как генеральная совокупность всех конкретных людей) или, по меньшей мере, как социум (совокупность конкретных людей в пределах определенного региона). Но субъектом может рассматриваться и каждый конкретный индивидуальный человек или группы людей, объединяемых по определенному признаку. В качестве субъектов могут рассматриваться также виды хозяйственной деятельности (почти бесконечное число видов), виды природных систем (в том числе каждый вид растительного и животного мира, популяции, биоценозы, ландшафты и т.д. Таким образом, видов субъектов может быть бесконечное множество.

Таким образом, полисубъектность пространства устойчивого развития приводит к бесконечному разнообразию оценок.

Не существует никаких способов некой объективной и правильной процедуры выбора ограниченного набора субъектов, кроме как принятия определенного общественного догово-

ра с установлением иерархии внутри этого набора.

Региональные и местные (муниципальные) подходы к выбору показателей устойчивого развития. Региональные и локальные (местные) условия диктуют необходимость особого набора характеристик, отражающих особенности этих регионов и местностей. Например, при оценке устойчивого развития регионов Российской Федерации они поделены на несколько групп: промышленные районы, аграрные районы, районы с большой долей горнодобывающей промышленности, районы со значительной долей финансового сектора и т.д.

В последние десятилетия происходят ощутимые изменения климата в Крыму (как и вообще на земном шаре). В отчете за 2018 год этот вопрос рассматривался. Следует еще раз подчеркнуть, что наиболее существенное значение имеют не абсолютные значения роста температуры воздуха (примерно 0,7 °C за столетие), а эффекты, связанные с разнонаправленными изменениями температуры по месяцам, а также увеличением изменчивости метеорологических элементов. Это приводит к увеличению неопределенности в прогнозах отопительного сезона, сроков высевания и уборки сельскохозяйственных культур, сроков рекреационного сезона, проведения различных мероприятий, зависящих от погодных условий и т.д.

Очень большие изменения в системе снабжения региона энергией и водными ресурсами произошли в связи с недружественными действиями украинских властей, распорядившихся о прекращении подачи в Крым воды и электроэнергии. Последствия этих действий можно значительно уменьшить путем более эффективного использования местных ресурсов. Для этого необходимо более глубокое знание территориального и временного распределения ресурсов, совершенствования системы мониторинга, требований различных субъектов к влаге, энергии, необходимой для соответствующих технологических режимов, температурному режиму.

На данном этапе выполнения проекта решается задача изучения соотношения получаемой информации о возобновляемых ресурсах региона с территориальными единицами управления: природными, социальными, экономическими. Исторически сложилась система получения информации в рамках ведомственных пространственно-временных единиц, ориентированных, в одних случаях, на природные единицы, в других, на административные единицы, в третьих, на хозяйственные единицы. Несоот-

ветствие единиц получения информации и управления системами имеет место и во временном аспекте.

Еще одна проблема – необычайно большая пространственно-временная неоднородность природных процессов и объектов, которая не находит соответствующего отображения в структуре мониторинга. Это связано, прежде всего, с недостатком средств, а, во-вторых, с недостаточной изученностью процессов и явлений. Отсюда большая доля элементов неопределенности в отображении структуры, динамики и организации явлений, в их прогнозировании. Следствием является высокая доля вероятностных моделей, подходов, которые, правда, нередко заменяются однозначно детерминированными моделями, что вводит в заблуждение пользователей, приводит к большому экономическому, социальному и экологическому ущербу.

Капиталом в экономике называют ресурсы, которые используются или могут быть использованы при производстве товаров и/или оказании услуг, другими словами – приносят доход. Различают следующие виды капитала: физический (искусственный, производственный), финансовый, человеческий (труд и интеллект), институциональный (социальный), природный (природные ландшафты и биосфера в целом). При производстве товаров и услуг важное место занимает природный капитал (доля природного капитала в богатстве стран оценивается от 40 до 50 %). На протяжении истории человечества всё большее число природных объектов приобретало функции природного капитала. По способности к возобновлению природный капитал делят на активный, или возобновляемый, и пассивный, или невозобновляемый – уголь, нефть, другие полезные ископаемые. К активному капиталу относятся ландшафты и экосистемы, а также их компоненты, которые способны к возобновлению.

Возобновляемый природный капитал обладает способностью к самовоспроизведению на основе использования солнечной энергии. Экосистемы и ландшафты могут быть источником товаров (например, древесина, ягоды, грибы и т.д.), а также обеспечивать производство экосистемных благ: воспроизводство воздуха и воды, регулирование климата, рекреация, предотвращение эрозии почв и т.д.

Природный капитал является важным элементом национального богатства России, на территории которой сосредоточены богатейшие природные ресурсы. При этом в природный ка-

питал входят не только материальные ресурсы (полезные ископаемые, почвы, растительный и животный мир, климат, ландшафт в целом и др.), но и местоположение или географическое положение, а также эстетические и культурные ценности, связанные с природой.

К такому пониманию сущности природного капитала пришли не сразу. А. Смит, а затем К. Маркс, на основе трудовой теории стоимости рассматривали богатство как результат материального производства, как-то, что создано трудом. «Всё, что не является результатом человеческой деятельности, результатом труда, есть природа и в качестве таковой не является социальным богатством», – говорил К. Маркс. Земля рассматривалась им как «резервуар потребительных стоимостей», которые ещё не опосредованы трудом. Природное богатство считалось бесплатным. Ещё один знаменитый экономист – А. Маршалл – говорил так: «Даровыми являются те блага, которые никем не присвоены и доставляются природой без приложения усилий человека». За ресурсы такого рода, согласно представлениям классиков экономической науки, следует платить лишь сумму, необходимую для их добычи и транспортировки. Положение о бесплатности природных благ долгое время господствовало в экономической науке. Оно способствовало расточительному и нерациональному использованию природных ресурсов.

Подходы к экономической оценке природных ресурсов. Природные ресурсы, как уже было выявлено выше, чрезвычайно разнообразны по своему характеру.

Наиболее хорошо поддаются экономической оценке извлекаемые для пользования виды природных ресурсов. В этом случае речь идет о ресурсах, которые непосредственно осязаемы, их можно, если хотите, пощупать. Некоторые из них извлекаются из природной среды, потребляются в виде пищи или входят в состав конечного продукта производства. Поэтому при их оценке часто используются затратный и результативных подходы.

В первом случае природные ресурсы оцениваются по затратам труда на вовлечение ресурса в производственную деятельность. Экономическая оценка природных ресурсов в затратном подходе должна включать следующие показатели:

- а) затраты, необходимые на разведку полезных ископаемых;
- б) затраты на освоение месторождений (подготовка, создание инфраструктуры);

в) затраты по добыче и подготовке к использованию;

г) затраты на создание сопутствующей инфраструктуры;

д) затраты на восстановление природных ресурсов (почвы, растительность, животных на территории освоения);

е) затраты на рекультивацию территорий.

Прямое использование леса как природного ресурса состоит из: устойчивой (неистощительной) заготовки древесины; заготовки лекарственных растений; «даров леса» (грибы, ягоды, орехи и пр.); туризма; устойчивая охоты и рыболовства. Все эти показатели являются вполне «осязаемыми», и они имеют свои цены, суммирование которых и даст прямую стоимость использования ресурсов.

С учетом степени важности для общества рационального использования природных ресурсов более правильным может являться результативный подход, основанный на учете потребительских свойств природных ресурсов. С этой точки зрения интерес представляет ценность природного ресурса через удельную способность удовлетворять определенную потребность или экономическая оценка его замещаемости через цену компенсации необходимых обществу функций при использовании другого природного ресурса.

Другими словами, результативная оценка природных ресурсов может определяться двумя способами – или по величине эффекта (дохода), который получен от использования природного ресурса, или по сумме издержек, которые необходимы, при замещении природных благ за счет других ресурсов (капитал, трудовые ресурсы, финансы).

Однако есть природные ресурсы, которые не изымаются из среды, выступают основой для той или иной деятельности. Например, водоемы используются для транспорта, рыболовства, купания. В этом случае ресурсы остаются на месте, хотя и в той или иной степени изменяют свои качества при привлечении их (загрязняются водоемы выбросами транспорта, топляком, лес может пострадать от пожара и др.).

Стоимость исчерпаемых источников энергии, сырья для промышленности определяется затратами на их добычу, транспортировку, переработку в конечный продукт и ценой этого продукта. Все, что проще добыть и ближе расположено к месту потребления, стоит дешевле. На рыночную стоимость ресурса, кроме того, влияет его исчерпаемость: чем ресурса меньше, тем он дороже. К примеру, цены на сырье для

производства фосфорных удобрений непрерывно растут вследствие дефицита этого ресурса. Важнейшее значение имеет определение стоимости ресурсов в зависимости от того возобновляемые они или невозобновляемые. Если ресурс возобновляемый, то при соблюдении первого правила Г. Дейли [4] (темпы потребления возобновляемых ресурсов не должны превышать темпов их восстановления (должны соблюдаться масштабы вылова рыбы в водоемах, отстрела охотничьей фауны, отбора воды в скважинах и реках, площадей вырубki леса и т.д.) – мы получаем ресурсы как бы бесплатно от природных ландшафтов, поскольку в этом случае материальные затраты связаны лишь с выемкой порции ресурса из ландшафта и перевозкой ее к месту потребления. Но для того, чтобы сохранять ландшафты вместе с соответствующими ресурсами, необходимы определенные затраты, связанные со слежением за соблюдением правил использования, ограничениями на посещение ландшафтов туристов, с восстановлением ландшафтов после природных стихийных бедствий и техногенных аварий.

Более сложным является определение не прямой (косвенной) стоимости использования природных ресурсов, когда ресурсы тесно связаны с экологическим потенциалом и экологическим равновесием. Этот показатель часто применяется в масштабе всей планеты или в довольно широком региональном аспекте. Например, косвенная стоимость использования леса складывается из следующих характеристик существования лесных массивов для экологических параметров территории: для связывания углекислого газа (смягчение парникового эффекта) и водорегулирующих функций (защита от наводнений), закрепления склонов и пр. При этом экологическое равновесие выступает своеобразным товаром, стоимость которого связана с прямыми затратами на охрану природной среды, а также с вложениями общества, связанными с отказом от перспективных в экономическом, но пагубных в экологическом смысле проектов.

Нужно различать понятия экономической ценности природы и цены природных ресурсов и услуг. Экономическая ценность охватывает все три функции природы, названные выше. Цена же фактически «работает» только в случае первой природной функции, оценки природных ресурсов. Если оценка первой функции рыночной экономикой осуществляется, хотя часто и с занижением, то экономические оценки второй и третьей природных функций практически от-

сутствуют или минимальны. А именно эти экономические оценки регулирующих функций, ассимиляционного потенциала и природных услуг являются решающими для определения экономической ценности многих природных объектов, например, биоразнообразия, особо охраняемых природных территорий и пр. При определении стоимости многое зависит от субъективных предпочтений, сложившихся моральных устоев, в том числе.

Еще один совершенно особый параметр природных ресурсов – пространственно-временной, связанный с положением ресурса относительно субъектов и объектов. Внутри названных типов мы также видим чрезвычайное разнообразие ресурсов по физическим, химическим и биологическим свойствам, по пространственной и временной устойчивости, по привязанности к территории и т.д. и т.п.

Сложностью для определения экономической ценности многих природных благ является тот факт, что они не продаются на рынке (чистый воздух, ландшафты и пр.). Большинство этих благ не имеют рыночной ценности и являются общественными товарами. Эти товары характеризуются совместным потреблением и неисключимостью. Это означает, что потребление общественного товара одним лицом не уменьшает возможности потребления этого товара другим индивидуумом. Например, потребление чистого воздуха одним человеком не снижает его потребление другими.

Таким образом, многие экологические товары являются общественной собственностью и/или ресурсами открытого доступа. Чрезмерное использование вместе со свободным или дешевым использованием этих ресурсов приводят к сверхэксплуатации, иногда вплоть до полной деградации природного блага, что мы наблюдаем нередко в тропических дождевых лесах, морском рыболовстве, при эксплуатации водоемов.

Итак, фактически стоимость возобновляемых извлекаемых природных ресурсов равна тем затратам, которые необходимы для сохранения нормального функционирования и восстановления ландшафтов, из которых происходит изъятие (извлечение) ресурсов.

Поскольку в каждом ландшафте может осуществляться потребление одновременно многих ресурсов, необходимо учитывать правило интегрального ресурса [5]: обычно одновременное использование разных ресурсов, имеющихся в каждом ландшафте сопровождается снижением эффективности, хотя бывают и об-

ратные ситуации, когда совместное использование некоторых ресурсов увеличивает эффективность). Например, участок прибрежной зоны моря можно использовать в качестве порта, курортной зоны, для мидиевой плантации, соревнований яхтсменов, рыболовства и др. Если одновременно развивать все названные виды деятельности, то они будут мешать друг другу: например портовая деятельность нанесет ущерб разведению мидий, функционированию курортной зоны и рыболовства. Поэтому обычно выбирают наиболее оптимальное пространственное сочетание этих видов деятельности с определенными затратами и прибылью.

Одновременное использование разных ресурсов, имеющихся в каждом ландшафте обычно сопровождается снижением эффективности, хотя бывают и обратные ситуации, когда совместное использование некоторых ресурсов увеличивает эффективность.

Использование извлекаемых невозобновляемых ресурсов (полезных ископаемых и др.) требует иного подхода. При оценке стоимости ресурсов необходимо учитывать темпы потребления невозобновляемых ресурсов: они не должны превышать темпов разработки их устойчивой возобновляемой замены (так, чтобы по мере исчерпания этих ресурсов человечество могло заменять их другими видами ресурсов);

Как ресурс рассматривается и способность к самоочищению и рекреационная емкость экосистем. При этом для определения стоимости ресурса оцениваются затраты на восстановление экосистем. Интенсивность выбросов загрязняющих веществ не должна превышать возможности окружающей среды поглощать и разлагать их (каждый ландшафт обладает определенной ассимиляционной емкостью).

Концепция общей экономической ценности является попыткой оценить не только хозяйственную значимость объекта, но и его ассимиляционную функцию. Под ассимиляционными функциями природной среды понимается ее способность обезвреживать и перерабатывать вредные вещества без изменения ее основных свойств.

Обобщая, следует подчеркнуть, что оптимальная стоимость природных ресурсов должна установиться на таком уровне, чтобы, с одной стороны, стимулировать их бережное использование, с другой — обеспечивать необходимое социальное благосостояние. Стоимость определяется не только затратами на добычу и обработку природного ресурса, но и на его воспол-

нение, как в случае полного расходования, так и в целях увеличения срока его функционирования — условие воспроизводства. Кроме того, стоимость природного ресурса призвана отражать экономический эффект от его использования в народном хозяйстве.

Заключение

Оценка уровня устойчивого развития стран и регионов является одной из важных задач человечества, поскольку позволяет выявить причины и следствия успехов и неудач развития, наметить эффективные пути управления развитием. Но сложности задачи очень велики и пока эффективных и всеми признанных путей ее решения нет. Накопленный за примерно 25 лет опыт разработки методов такой оценки позволил разработать несколько групп методов, каждый из которых раскрывает различные аспекты проблемы, дополняя друг друга. В каждом регионе, обладающем своими особенностями социокультурного и исторического развития и природно-ресурсного потенциала, оценка уровня развития и пути управления развитием имеют свою специфику. Вместе с тем регионы должны сравниваться и по единым методикам, которые позволяют видеть различия, вызываемые базовым несходством регионов. Эти различия не должны быть слишком велики, причем отставание одних регионов в одних аспектах должны компенсироваться преимуществами в других. Очевидно различные группы людей будут выбирать свой вариант соотношения параметров региональных ситуаций. Такой подход от отображает принцип «жизнь в разнообразии».

Список литературы

1. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodology. — New York: UN Department of Economic and Social Affairs, 2001.
2. Индикаторы устойчивого развития России. — М.: ЦППР, 2001. 219 с.
3. Edwin K.L. Tam. Challenges in using environmental indicators for measuring sustainability practices // Journal of Environment Engineering Science. — 2002. — № 1. — P. 417–425.
4. Ретеюм А.Ю. Двенадцать лет из жизни страны. — М.: Хорион, 2004. — 144 с.
5. Тарасова Н. П., Кручина Е. Б. Индексы и индикаторы устойчивого развития // Материалы международной конференции «Устойчивое развитие: природа — общество — человек». — Т. 1. — М., 2006. — С. 127—144.

6. Згуровский М. З., Статюха Г. А. Системный подход к оценке и управлению устойчивым развитием общества // Системні дослідження та інформаційні технології, 2007, № 3.
7. Бобылев С.Н., Зубаревич Н.В., Соловьева С.В., Власов Ю.С. Устойчивое развитие: методология и методики измерения. М.: Экономика, 2011.
8. Боков В.А. Ена В.Г., Ефимов С.А., Русяев В.Ф. Устойчивое развитие – стратегия развития Крыма в 21 веке. - Симферополь: Ассоциация поддержки биологического и ландшафтного разнообразия Крыма – Гурзуф-97, 2000. - 80 с.
9. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма. – Симферополь: Доля, 2009. – 325 с.
10. Калиновский П.С., Емельянова Н.С., Менюк Е.Н. Подходы к построению критериев устойчивого развития в работах М.З. Згуровского // Геополитика и экогеодинамика регионов. - 2015. – Т. 1 (11), вып. 2. - С. 20-31 (0,77 п.л.)
11. Крым в параметрах устойчивого развития. Под ред. В. С.Т арасенко. – Симферополь: Оригинал-М, 2008. – 192 с.
12. Доклад Живая планета, 2014. https://www.footprintnetwork.org/content/images/article/uploads/LPR_2014_SUMMARY_ru_net.pdf
13. Всемирный индекс счастья (The Happy Planet Index) <https://gtmarket.ru/ratings/happy-planet-index/info>
14. Рейтинг стран мира по уровню счастья ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЁННЫХ НАЦИЙ (World Happiness Report) <https://gtmarket.ru/ratings/world-happiness-report/info> ООН
15. Згуровский М. З., Статюха Г. А. Роль инженерной науки и практики в устойчивом развитии общества // Системні дослідження та інформаційні технології, 2007 № 1 с.19-38.
16. Ресурсная эффективность — ключ к технологиям XXI века. Лекция Э.Вайцсеккера 1 мая 2012 года в Лектории Политехнического музея Москвы. <https://polit.ru/article/2012/06/26/weizsecker/>.
17. Елдышев Ю.Н. Какие страны наиболее «вредны» для окружающей среды и почему // хроника <http://www.ladoga-park.ru/a101017220323.html>
18. Люри Д.И. Развитие ресурсопользования и экологические кризисы. — М.: Дельта, 1997. — 238 с.
19. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М. Системное моделирование процессов устойчивого развития. Симферополь. Издательство Таврического национального университета. 2005. —180 с.

References

1. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodology. — New York: UN Department of Economic and Social Affairs, 2001.
2. Indicators of sustainable development of Russia. - M.: TsPRP, 2001. 219 s.
3. Edwin K.L. Tam. Challenges in using environmental indicators for measuring sustainability practices //

- Journal of Environment Engineering Science. — 2002. — № 1. — P. 417–425.
4. Reteyum A.Yu. Twelve years in the life of the country. - M.: Chorion, 2004. - 144 p.
 5. Tarasova N. P., Kruchina E. B. Indices and indices of sustainable development // Proceedings of the international conference “Sustainable development: nature - society - man”. - T. 1. - M., 2006. - p. 127-1144.
 6. Zgurovsky M. Z., Statyuha G. A. A systematic approach to the assessment and management of the sustainable development of the society // Systemic analysis and in -formatsiyni tehnologii, 2007, № 3.
 7. Bobylev S.N., Zubarevich N.V., Soloveva S.V., Vlasov Yu.S. Sustainable development: methodology and measurement techniques. M.: Economy, 2011.
 8. Bokov V.A. Ena V.G., Efimov S.A., Rusyaev V.F. Sustainable development is the development strategy of the Crimea in the 21st century. - Simferopol: Association for the support of biological and landscape diversity of Crimea - Gurzuf-97, 2000. - 80 p.
 9. Solar energy for sustainable development of the Crimea. - Simferopol: Share, 2009. - 325 p.
 10. Kalinovskiy P.S., Emelyanova N.S., Menyuk E.N. Approaches to building criteria for sustainable development in the works of M.Z. Zgurovsky // Geopolitics and ecogeodynamics of regions. - 2015. - V. 1 (11), no. 2. - p. 20-31 (0.77 p. L.)
 11. Crimea in the parameters of sustainable development. Ed. V.S. Tarasenko. - Simferopol: Original-M, 2008. - 192 p.
 12. Live Planet Report, 2014. https://www.footprintnetwork.org/content/images/article_uploads/LPR_2014_SUMMARY_ru_net.pdf
 13. The Happy World Index (The Happy Planet Index) <https://gtmarket.ru/ratings/happy-planet-index/info>
 14. Rating of countries of the world in terms of the happiness of the United Nations Organization Organizing Organization (World Happiness Report) <https://gtmarket.ru/ratings/world-happiness-report/info> UN
 15. Zgurovsky M. Z., Fortekh G.A. The Role of Engineering Science and Practice in the Sustainable Development of Society // System Research and Information Technology, 2007 No. 1, pp. 19-38.
 16. Resource efficiency is the key to the technologies of the 21st century. Lecture by E. Weizsäcker on May 1, 2012 in the Lecture Hall of the Polytechnic Museum of Moscow. <https://polit.ru/article/2012/06/26/weizsecker/>.
 17. Eldyshev Yu.N. Which countries are the most “harmful” for the environment and why // chronicle <http://www.ladoga-park.ru/a101017220323.html>
 18. Luri D.I. Development of resource use and ecological crises. - M.: Delta, 1997. - 238 p.
 19. Timchenko I.E., Igumnova E.M. System modeling of sustainable development processes. Simferopol. Publisher Tavricheskogo National University. 2005. –180 s.

УДК 621.31

Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя

В.В. Гурьев¹, Е.Г. Какушина², Б.А. Якимович³, В.В. Кувшинов⁴

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, E-mail: ¹guryevvv@tavrida.so-ups.ru, ²littie@mail.ru, ³yakimovich52@gmail.com,
⁴kuvshinov.vladimir@gmail.com⁴

Статья поступила 18.04.2019 г.; после доработки 22.04.2019 г

Аннотация

Влияние вырабатываемой мощности возобновляемых источников электроэнергии на режимы работы энергосистемы. Мировой опыт управления ВИЭ. Решение проблем управления энергосистем с существенной составляющей возобновляемых источников электроэнергии. Рассмотрение влияния генерирующей мощности на энергосистему в различные периоды года.

Ключевые слова: управление энергосистемой, возобновляемая энергетика, оптимизация режимов работы энергосистем, развитие возобновляемой энергетика, обеспечение надежности энергосистемы, оказание влияния ВИЭ на энергосистему.

Development of renewable sources of electric energy in the energy systems of the Republic of Crimea and g. Sevastopol

V.V. Guryev¹, E.G. Kakushina², B.A. Yakimovich³, V.V. Kuvshinov⁴.

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
E-mail: ¹guryevvv@tavrida.so-ups.ru, ²littie@mail.ru ³yakimovich52@gmail.com,
⁴kuvshinov.vladimir@gmail.com

Received 18.04.2019 y.; received in final form 22.04.2019 y

Annotation

The impact of the generated power of renewable energy sources on the operating modes of the power system. World experience in the management of renewable energy. Solving power management problems with a substantial component of renewable energy sources. Consideration of the impact of generating capacity on the power system in different periods of the year.

Keywords: power system management, renewable energy, optimization of operating modes of the energy system, development of renewable energy, ensuring the reliability of the energy system, the impact of renewable energy sources on the energy system.

Введение

Уже почти десять лет прошло с тех пор, как распоряжением Правительства РФ в январе

2009 года были утверждены основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возоб-

новляемых источников энергии на период до 2024 года. Документ устанавливает целевые показатели производства и потребления электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии (кроме гидроэлектростанций установленной мощностью более 25 МВт).

Согласно документу, доля ВИЭ в производстве электроэнергии в РФ должна достигать 1,5 %, 2,5 % и 4,5 % в 2010, 2015 и 2024 годах соответственно. Сейчас в составе Единой энергосистемы России работает 31 солнечная электростанция (СЭС) общей установленной мощностью 594,219 МВт и 14 ветровых электростанций (ВЭС), общая установленная мощность которых составляет 139,013 МВт. [1]

Энергосистема Республики Крым и г. Севастополя является уникальной с точки зрения структуры установленной мощности, где 33% составляет генерация, работающая на основе возобновляемых источников энергии [9].

В настоящее время производителей электрической энергии в энергосистеме можно разбить на следующие основные группы:

- ТЭЦ – тепловые электроцентралы;
- МГТЭС – мобильные газотурбинные электрические станции;
- ВИЭ – возобновляемые источники электроэнергии, в т.ч. СЭС (солнечные электростанции) и ВЭС (ветровые электростанции);
- РИСЭ – резервные источники электропитания;
- ЭНЕРГОМОСТ (кабельно-воздушные линии (далее – КВЛ) электропередач и подстанции, построенные для подключения энергосистемы Крыма к ЕЭС России (ОЭС Юга)) [9].

Структурная схема энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя приведена на рис. 1.

В таблице 1 представлены установленная мощность первичных производителей электроэнергии Крыма. Суммарная мощность тепловых электростанций составляет 1246 МВт, мобильных газотурбинных электрических станций – 396,1 МВт, возобновляемых источников электроэнергии – 388,5 МВт, мощность резервных источников – 121 МВт [9].

Необходимо заметить, что в летний период вырабатываемая мощность СЭС, при неблагоприятных природных условиях, может снижаться почти на 90%, в то время как существенная часть генерирующих мощностей тепловых

электростанций находится в плановых ремонтах [9].

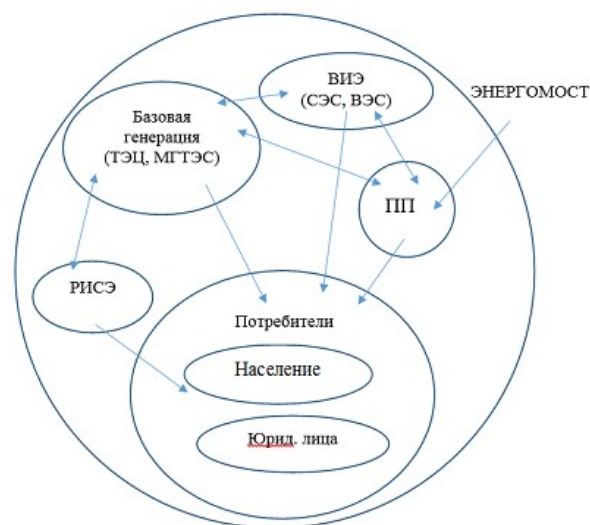


Рис. 1 – Структура энергосистемы Крыма

Сложившаяся ситуация заставляет искать решения внедрения новых технологий управления энергосистемами с большой долей генерации СЭС и ВЭС в структуре установленной мощности [2].

Мировой опыт эксплуатации солнечной и ветрогенерации свидетельствует о том, что в энергосистемах с совокупной мощностью СЭС и ВЭС свыше 30 % от общей установленной мощности по-новому встает вопрос обеспечения баланса производства и потребления электроэнергии, в частности вопрос резервирования солнечных и ветровых электростанций, поскольку выработка СЭС и ВЭС полностью зависит от метеоусловий и по этой причине крайне нестабильна.

Эту нестабильность нужно резервировать мощностью «традиционных» [9] энергоблоков, которые должны в случае снижения выработки СЭС и ВЭС быстро включаться или вообще находиться во вращающемся резерве, да и к тому же быть очень мобильными для быстрого набора нагрузки. Как говорят специалисты, при больших объемах СЭС и ВЭС в энергосистеме наряду с так называемой «пилой нагрузки», связанной с утренним и вечерним максимумом потребления, появляется еще и «пила генерации». Из-за резкопеременной нагрузки солнечных и ветровых электростанций меняется «характер» энергосистемы, ее инерция. Образно говоря, «дыхание энергосистемы» перестает быть плавным.

Используемые методы управления

В энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя работа солнечной и ветрогенерации обеспечивается следующим образом: с учетом своей аналитики метеоданных солнечные и ветровые электростанции сами прогнозируют свой график нагрузки и представляют его в Системный оператор для учета в диспетчерском графике. Из-за сложностей с точностью прогнозирования природных явлений вероятность исполнения такого графика со стороны СЭС и ВЭС ниже, чем у традиционных электростанций. [1]

Несмотря на то, что ВИЭ работают на розничном рынке, их влияние на результат работы гарантирующего [9] поставщика тоже весьма значителен, так как именно гарантирующий поставщик приобретает поставляемую электроэнергию на розничном рынке у ВИЭ. В связи с этим проблема повышения эффективности прогнозирования выработки ВИЭ является крайне актуальной. Вместе с тем, остается большое количество вопросов стандартизации технических требований к вводимому оборудованию ВИЭ.

Кроме вопроса стандартизации технических требований к оборудованию ВИЭ для надежной работы энергосистем со значительным объемом ВИЭ необходимо развивать системы прогнозирования выработки ВИЭ, поскольку в отсутствие достоверных прогнозов их работы в энергосистеме необходимо постоянно поддерживать полноценное резервирование в объеме ВИЭ, что фактически означает необходимость дополнительного включения тепловой генерации и ее работы в неэкономичных режимах и/или резервирования пропускной способности электрических сетей и перегрузки линий электропередач [9].

На примере энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя, в которой в 2017 г. были достигнуты многолетние максимумы энергопотребления: 1427 МВт – зимний максимум и 1249 МВт – летний максимум [2] предлагаются следующие расчетные сценарии режимов работы энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя с учетом роста ВИЭ и потребления населения с расчетом до 2024 года:

1. Межсезонье. Ремонты ТЭЦ и МГТЭС. Минимальная солнечная активность. Нагрузка потребления 1250 МВт.
2. Летний период. Максимальная солнечная активность. Пиковое потребление - 1374 МВт.

3. Зимний период. Минимальная солнечная активность. Пиковое потребление - 1570 МВт. Максимальная солнечная активность. Пиковое потребление - 1570 МВт. Максимальная мощность МГТЭС, ТЭЦ и ТЭС.
4. Максимальная солнечная активность. Невысокая нагрузка потребления - 1000 МВт. Максимальная мощность МГТЭС, ТЭЦ и ТЭС.

Исходные расчетные данные и результаты расчетов приведены в таблице 1, мощность ТЭЦ и МГТЭС заданы с учетом ремонтных работ, ВИЭ в зависимости от моделируемых природных факторов в различных периодах года и с учетом потребления энергосистемы.

Таблица 1. Расчет различных сценариев энергообеспечения

№	Нагрузка, МВт	Генерация, МВт	Фактическая мощность генерации, МВт	Дефицит, МВт
1	1250	ТЭЦ – 306,34 МГТЭС – 396,1 ВИЭ – 20 РИСЭ – 60 Энергомост – 810	ТЭЦ – 100 МГТЭС – 200 ВИЭ – 20 РИСЭ – 60 Энергомост – 810	-60
2	1374	ТЭЦ – 306,4 МГТЭС – 396,1 ВИЭ – 230 РИСЭ – 60 Энергомост – 810	ТЭЦ – 110 МГТЭС – 354 ВИЭ – 230 РИСЭ – 0 Энергомост – 680	76
3	1570	ТЭЦ – 306,4 МГТЭС – 396,1 ВИЭ – 20 РИСЭ – 60 Энергомост – 810	ТЭЦ – 130 МГТЭС – 370 ВИЭ – 20 РИСЭ – 60 Энергомост – 810	-180
4	1570	ТЭЦ – 1246,34 МГТЭС – 396,1 ВИЭ – 230 РИСЭ – 60 Энергомост – 810	ТЭЦ – 1204 МГТЭС – 0 ВИЭ – 230 РИСЭ – 0 Энергомост – 366	0
5	1000	ТЭЦ – 1246,34 МГТЭС – 396,1 ВИЭ – 230 РИСЭ – 60 Энергомост – 810	ТЭЦ – 1204 МГТЭС – 0 ВИЭ – 230 РИСЭ – 0 Энергомост – 0	434

Выбор варианта развития энергосистемы

Проведенный анализ показал непосредственное влияние ВИЭ на режимы работы энергосистемы в различное время года. С учетом роста ВИЭ в развивающихся энергосистемах применимы несколько вариантов развития:

1. Необходимо при строительстве ВИЭ учитывать равномерное распределение по энергосистеме, что помогает снизить влия-

ние локальных метеоусловий на общую выработку СЭС и ВЭС;

2. Использование гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС). Активная разработка технологии производства альтернативных традиционным ГА накопителей
3. большой мощности.
4. Наиболее приемлемый и экономически обоснованный метод – это решение проблемы нестабильной выработки за счет использования маневренных характеристик гидроэлектростанций, газотурбинных и парогазовых электростанций, развитие связей между энергосистемами, обеспечивающих необходимый переток активной мощности от маневренных традиционных электростанций в узлы потребления.

Выводы

На данном этапе развития ВИЭ параллельно идет процесс разработки требований к СЭС и ВЭС с учетом свойств новой этим станциям специфики для обеспечения их работы в составе ЕЭС России. В нее очень активно включен Системный оператор Единой энергетической системы, поскольку от качества нормативно-технологической базы по ВИЭ в ближайшие десятилетия будет, без преувеличения, зависеть надежность Единой энергосистемы.

Если не всей, то уж точно отдельных ее регионов.

На сегодняшний день в нормативно-технической базе в части ВИЭ основополагающими документами являются:

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 года № 937 утверждены Правила технологического функционирования электроэнергетических систем, определившие впервые на таком уровне требования к ВИЭ-генерации.
2. Порядок отдачи и регистрации стандартных документируемых диспетчерских команд утвержденный 28.12.2018г и введенного в действие с 01 декабря 2018 года куда были внесены дополнения в части управления нагрузкой ВИЭ.

Изучение мировой практики подтвердило, что с увеличением объема альтернативной энергетики возникает необходимость учета ее влияния на энергосистему не только решением технических вопросов, но и создания соответствующей нормативной базы, обеспечивающей нормальную работу СЭС и ВЭС в составе электроэнергетического комплекса.

Список литературы

1. Корпоративный журнал 50 Гц АО «СО ЕЭС» 2018 -10 с.
2. Кондратьев С. В., Агибалов С. В. Крым: снова с Россией. Аналитический отчет. – Институт Энергетики и Финансов, 2014. – 38 с.
3. Энергомост в Крым. https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергомост_в_Крым
4. Энергетика Крыма сегодня. Обзор // Энергосовет. №2 (33) 2014. С. 52-55.
5. Энергетика Крыма. https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергетика_Крыма.
6. Четырнадцать мобильных ГТЭС генерируют электроэнергию для Крыма. <https://ria.ru/society/20160101/1352835545.html>.
7. Ветроэнергетика в 2018 году. <https://os1.ru/article/17801-vetroenergetika-v-2018-godu>.
8. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 120 с.
9. Вологдин С.В. Математическая модель оптимизации режима работы энергосистемы республики Крым и г. Севастополя / В.В. Гурьев, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов // Энергетические установки и технологии – 2018. Т. 4. № 4. С. 50-54.

References

1. Corporate magazine 50 Hz of JSC SO UES 2018 -10 p.
2. Kondratiev S. V., Agibalov S. V. Crimea: again with Russia. Analytical report. - Institute of Energy and Finance, 2014. - 38 p.
3. Energomost to the Crimea. https://ru.wikipedia.org/wiki/Energomost_v_Krym
4. Energy Crimea today. Review // Energy Council. №2 (33) 2014. pp. 52-55.
5. Energy Crimea. https://ru.wikipedia.org/wiki/Energy_Crimea.
6. Fourteen mobile gas turbine power plants generate electricity for the Crimea. <https://ria.ru/society/20160101/1352835545.html>.
7. Wind power in 2018. <https://os1.ru/article/17801-vetroenergetika-v-2018-godu>.
8. Kostin V.N. Optimization problems of electric power industry: Tutorial. - SPb.: SZTU, 2003. - 120 p.
9. Vologdin S.V. Mathematical model of optimization of the operating mode of the power system of the Republic of Crimea and the city of Crimea Sevastopol / V.V. Guriev, B.A. Yakimovich, V.V. Kuvshinov // Power plants and technologies - 2018. T. 4. No. 4. P. 50-54.

УДК 620.92

Комбинированная солнечно-биоэнергетическая установка для сельского хозяйства Республики Крым

И.Г. Жиганов¹, В.В. Кувшинова², А.А. Ненько³, Д.С. Здарьев⁴

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, zhiganov80@gmail.com¹, kuvshinov.vladimir@gmail.com², neie@mail.ru³,
dima8s@yandex.com⁴

Статья поступила 26.04.2019 г.; после доработки 30.04.2019 г.

Аннотация

По программе развития возобновляемой энергетики в России применение биомассы является одним из ключевого направления для развития данного вида энергетики. Предложен новый тип установки, отличающийся от ранее разработанного, который позволяет с большей эффективностью использовать ненужные сельскохозяйственные отходы. Описаны исследования, проведенные сотрудниками кафедры Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети, по программе внедрения биоэнергетических технологий на основе установок по переработки биомассы.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, биогазовые технологии, биоэнергетическая установка, солнечная энергетика, биомасса.

Combined solar-bioenergy installation for agriculture of the Republic of Crimea

I.G. Zhiganov¹, V.V. Kuvshinova², A.A. Nenko³, V.V. Zdarev⁴

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, zhiganov80@gmail.com¹,
kuvshinov.vladimir@gmail.com², neic@mail.ru³, dima8s@yandex.com⁴

Received 26.04.2019 y.; received in final form 30.04.2019 y.

Abstract

According to the program for the development of renewable energy in Russia, the use of biomass is one of the key areas for the development of this type of energy. A new type of plant has been proposed, which differs from the previously developed one, which makes it possible to use unnecessary agricultural waste with greater efficiency. Describes the research conducted by the staff of the department Renewable energy sources and electrical systems and networks, according to the program of introduction of bioenergy technologies based on biomass processing plants.

Keywords: renewable energy sources, biogas technologies, bioenergy plant, solar energy, biomass.

Введение

После возвращения Крыма в состав Российской Федерации возникла проблема энергетической зависимости полуострова от материка [1]. По основным видам энергии, таким как тепловая, электрическая, выработка газа в Крыму имелся дефицит.

Во времена СССР независимости полуострова по выработке электроэнергии пытались

достичь путем строительства атомной электростанции, но в 1987 году на стадии готовности первого энергоблока АЭС порядка 80% работы прекратили – сказалась черномыльская катастрофа. Потребление электроэнергии в Крыму составляет 1249 МВт в летнее время и 1427 МВт в зимнее. Сейчас потребности в электроэнергии покрывают 4 ТЭС (Симферопольская ТЭЦ 100 МВт, Севастопольская ТЭЦ 33 МВт, Сакская ТЭЦ 12 МВт, Камыш-Бурунская ТЭЦ 32 МВт)

общей мощностью 177МВт и «Энергомост» электроэнергию которого генерирует Ростовская АЭС в объеме 720МВт. В пиковые часы энергопотребления дополнительно включаются дизель-генераторные станции. Для снижения нагрузки на Ростовскую АЭС было решено построить две крымские ТЭС – Таврическую и Балаклавскую ТЭС по 470 МВт каждая. Турбины этих электростанций изготавливаются на заводах Siemens, особенностью которых является работа с одинаковой эффективностью на различных видах газа, в том числе и на дизельном топливе. В проектной производительности турбины вырабатывают только электроэнергию с КПД 52%, но при необходимости возможен переход на когенерационный режим с выработкой примерно такого же объема тепловой энергии.

На сегодняшний день Республика Крым полностью обеспечивает себя газом. Потребление газа примерно равно его добыче: 1,5—1,6 млрд кубометров в год. В Крыму еще с советского времени добывался собственный газ от открытого в ноябре 1960 года Глебовского газоконденсатного месторождения с запасами объемом 4,6 млрд м³. На сегодня Глебовское месторождение исчерпало свои запасы и используется как подземное хранилище. Глебовское подземное хранилище, накапливая газ летом, позволяло полуострову мягко проходить зимний пик потребления газа. В последнее время разрабатывается Северо-Казантипское месторождение, в 1999 году запасы газа оценивались в 18-20 миллиардов кубометров, а так же разрабатываются морские месторождения на шельфе (Голицынское ГМ, Безымянное ГМ, Штормовое ГМ). Разработка месторождений ведется Крымским республиканским предприятием «Черноморнефтегаз» Крымгазсети. В 2016г. был запущен газопровод «Краснодарский край-Крым» с проектным объемом перекачки 4,4 млрд. м³ в год. Этого газа хватит чтобы покрыть потребление газа строящихся в Симферополе и Севастополе ТЭС.

Проблема газификации в Республике Крым является одной из наиболее острых социальных задач. В настоящее время в жилом фонде Республики Крым числятся 803945 квартир и домовладений, из них газифицировано природным газом 563325 квартир и домовладений. Общий уровень газификации населенных пунктов Республики Крым на 01.01.2016 - 72,4 процента, в том числе городов и поселков - 86,8 процента, сел - 46,2 процента. В настоящее время из 1022 населенных пунктов Республики Крым остаются не газифицированными 556 сел и г. Алушка,

или 54,5 процентов от общего их количества. Особо стоит отметить уровень газификации восточной части Крыма, где он составляет от 9 до 18 процентов, и населенных пунктов южного берега Крыма.

Анализируя ситуацию в Крыму можно прийти к выводу, что нерешенная до конца энергетическая независимость полуострова, низкая газификация сельского населения и перспектива увеличения потребления газа на производство электрической энергии вынуждает к поиску альтернативных источников газификации. Возможный дефицит в газе сельского населения может быть покрыт, в частности, за счет широкого привлечения потенциала нетрадиционных источников энергии [2,3], энергии из биомассы, к которой относят:

- остатки сельскохозяйственных растений;
- отходы животноводства (навоз);
- отходы лесоводства и лесопереработки.

Известны следующие основные способы получения энергии из биомассы:

- непосредственное сжигание;
- термохимический метод (газификация, пиролиз);
- биологический метод (анаэробное сбраживание).

Эти способы находят достаточно широкое применение во многих странах мира, даже в таких энергодостаточных как Дания, Швеция, Финляндия и др. Первые два способа применяются для переработки остатков сельскохозяйственных растений, отходов лесоводства и лесопереработки; третий - отходов животноводства.

Постановка задачи исследования

В этой статье мы остановимся на перспективе внедрения биогазовых технологий. По данным госкомстата, поголовье скота и птицы в республике Крым на 1 января 2017г. приведено в таблице 1 в тыс. голов. Можем рассчитать максимально возможную выработку биогаза из навоза домашнего скота эта величина равняется 173 млн. м³ в год, что в процентном отношении к потреблению газа равняется 11%.

Добиться больших результатов во внедрении биогазовых технологий в сельское хозяйство Крыма позволит использование опыта передовых стран (Китай, Германия). Китай пошел по пути разработки простейшего биореактора для малых и средних фермерских хозяйств. В Крыму ситуация схожа с Китаем – из общего поголовья большая часть находится в местных

домовладениях и малых фермерских хозяйствах.

Таблица 1. Поголовье скота и птицы в республике Крым

	Все категории хозяйств		
	2016	2017	В % к 2016
Крупный рогатый скот	110,5	116,0	104,9
в т. ч. коровы	59,1	62,4	105,6
Свиньи	161,2	146,8	91,1
Овцы и козы	210,2	225,6	107,3
Птица	9283,2	7300,9	78,6

Типичная биогазовая установка для малых ферм Китайского типа (БГУ) (рис. 1) имеет в своем составе ферментатор 1, загрузочный бункер 2, выходную трубу 3, блок-контейнер для подготовки и сжигания газа 4, подогреватель 5, перемешивающий устройство 6, циркуляционный насос для теплоносителя 7. Отходы с влажностью 86 - 97% подаются в загрузочный бункер 2, откуда попадают в нижнюю часть ферментатора. Во время пребывания в ферментаторе сырье подогревается до необходимой температуры нагревателем 5 и проходит три стадии брожения с помощью различных групп микроорганизмов.

Во время последней стадии проходит процесс образования метана. После этого сброженная масса попадает к выходу через выходной трубопровод 3, после чего используется как натуральные качественные органоминеральные удобрения.

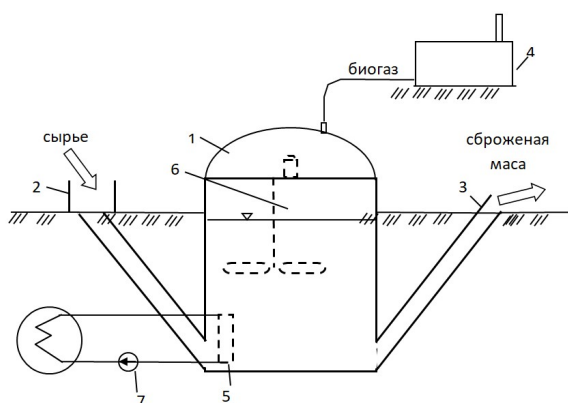


Рис.1. БГУ для малых ферм.

В данной статье предлагается модернизировать китайский тип биореактора путем разработки комбинированной системы с другими не-

традиционными источниками, в частности с солнечными коллекторами. На рис. 2 показана блок-схема работы комбинированной солнечно-биогазовой установки с энергетическими и массовыми потоками. Как видно из блок-схемы выходными потоками от биореактора являются высококачественные удобрения и биогаз. Биогаз представляет из себя смесь CH_4 и CO_2 . В зависимости от режима брожения, метана может быть в биогазе от 50 до 70%. Теплотворная способность биогаза при этом составляет 24 МДж/м^3 , что не на много меньше теплотворной способности природного газа. Это свойство биогаза позволяет использовать его на заводских газовых плитах с незначительной модернизацией сопла конфорки.

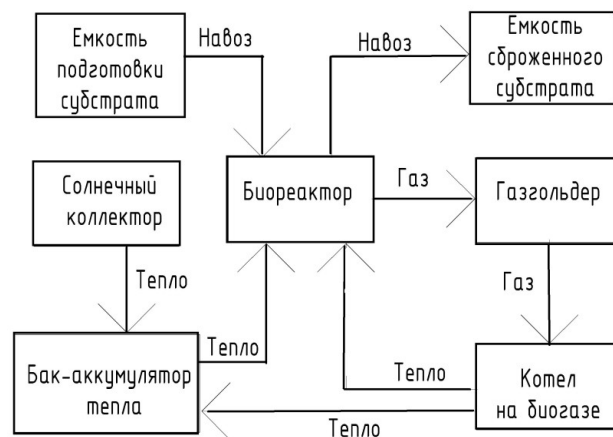


Рис. 2. Блок-схема массовых и энергетических потоков солнечно-биоустановки.

Результаты исследования

Чтобы оценить эффективность работы биогазовых реакторов и комбинированных солнечно-биогазовых реакторов требуется выбор критерия эффективности. Таким критерием может стать товарная часть энергии, произведенная биогазовой установкой ΔE .

Общее выражение эффекта энергетического баланса БЕУ:

$$\Delta E = E_6 - \sum_{i=1}^n Q_i,$$

где ΔE – товарная часть энергии;

E_6 – произведенная энергия в виде энергоёмкости биогаза;

$\sum_{i=1}^n Q_i$ – энергия в виде суммы энергозатрат,

которая необходима для проведения технологических процессов.

При работе биогазовой установки не весь газ используется в коммерческих целях, часть

биогаза расходуется на собственные нужды. В зависимости от климатических условий часть биогаза используется на такие нужды, как нагрев субстрата, компенсация тепловых потерь от биореактора.

Энергозатраты с учетом веса компонентов возможно показать в виде:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

где Q_1 – количество тепла, необходимое на нагрев суточной дозы исходной биомассы (навоза);

Q_2 – количество тепла на первоначальный нагрев биомассы в объеме реактора;

Q_3 – количество тепла на термостатирование биомассы в реакторе; компенсации теплотер в окружающую среду;

Q_4 – количество тепла на химико-микробиологические процессы при сбраживании;

Q_5 – энергозатраты на технологические операции транспортировки, загрузки-выгрузки исходных и конечных продуктов брожения (биомасса, биогаз);

Q_6 – энергозатраты на подготовку измельчения, перемешивания субстрата.

В Запорожском институте механизации и электрификации сельского хозяйства проводились исследования энергозатрат на разработанных ими приусадебных биогазовых установках ПБУ-4. Итоги этих исследований приведены на рис. 3. Согласно этих данных основными долями потребляемой энергии являются нагрев субстрата и компенсация теплотер.

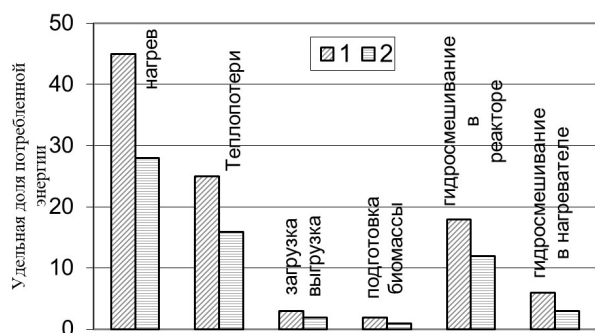


Рис. 3. Удельная доля потребляемой энергии технологическими процессами в общих затратах энергии (1) и в выработанной энергии биогаза (2).

На рис. 4 согласно тому же источнику можно видеть зависимость доли энергозатрат на нагрев и термостатирование в зависимости от объема биореактора.

Можем сделать вывод, что до объема реактора 100 м^3 существенной долей энергозатрат являются теплотер, а при дальнейшем уве-

личении объема биореактора долей теплотер можно пренебречь. Однако при современных способах утепления всех компонентов биогазовой установки долю теплотер возможно привести к 10-15%, поэтому основным источником потребления энергии все же надо считать нагрев свежей биомассы.



Рис. 4. Зависимость потребности в тепловой энергии от объемов реакторов с учетом теплотер.

Расчет энергии произведенного биогаза, можно вести по формуле:

$$E_B = e_B \cdot B,$$

где e_B – теплота сгорания энергоносителя, биогаза, 24 МДж/м^3 ;

B – количество энергоносителя, теоретический выход биогаза, м^3 .

Теоретический выход биогаза определяем согласно упрощенному выражению [4,5,6]:

• навоза крупного рогатого скота (КРС):

$$B_{\text{КРС}} = (241536 - 291456 \cdot W + 0,4992 \cdot W^2) \cdot V \cdot D \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / \text{сутки}$$

• навоза свиней:

$$B_C = (268416 - 345216 \cdot W + 0,768 \cdot W^2) \cdot V \cdot D \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / \text{сутки}$$

Где W – влажность субстрата;

V – объем субстрата в реакторе, м^3 ;

D – доля суточной загрузки реактора.

Выводы

Согласно приведенным исследованиям основными затратами энергии в биогазовой установке являются затраты на нагрев биомассы в среднем 30% от выработанного объема энергии биогаза и затраты на поддержание температуры брожения 10%, что вообще составляет 30% энергии биогаза.

Использование солнечной энергии в солнечно-биогазовой установке сможет в летнее

время снизить затраты до нуля, а в зимнее время сократить на 80%.

Список литературы

1. Кувшинов В.В., Башта А.И. Солнечная энергетика для развития рекреационного комплекса Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов, Симферополь, 2015, Т 1, №11 (17), С. 23-29.
2. Официальный сайт Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю <http://crimea.gks.ru>.
3. Официальный сайт Государственного унитарного предприятия Республики Крым "Черноморнефтегаз" <http://gas.crimea.ru/>.
4. Мовсесов Г. Е. и др. Отчет о научно-технической работе «Усовершенствовать технологический процесс и оборудование сбраживания навоза и разработать биоэнергетические установки (БЕУ) нового поколения» Украинская Академия Аграрных Наук. Институт механизации животноводства.(ИМЖ), Запорожье, 1998г.
5. Мовсесов Г., Павличенко В., Ягудин Л. Технологический регламент комплекта оборудования биоэнергетической установки К-Р-9-1 для анаэробного сбраживания навоза, ЦНИПТИМЭЖ, Запорожье, 1989г.
6. Малиаренко В.А., Капцов И.И., Жиганов И.Г. «Перспективы использования биоэнергетических технологий в Украине», Научные журналы НТУ "ХПИ": Интегрированные технологии и энергосбережение №2 - НТУ "ХПИ", Харьков, 2005г. - ISSN 2078-5364.

References

1. Kuvshinov V.V., Bashta A.I. Solar energy for the development of the recreational complex of the Crimea // Geopolitics and ecogeo-dynamics of the regions, Simferopol, 2015, T 1, No. 11 (17), p. 23-29.
2. The official website of the Office of the Federal State Statistics Service for the Republic of Crimea and the city of Sevastopol <http://crimea.gks.ru>.
3. Official site of the State Unitary Enterprise of the Republic of Crimea "Chernomorneftegaz" <http://gas.crimea.ru/>.
4. Movsesov G.Ye. et al. Report on the scientific and technical work "Improve the technological process and equipment for manure digestion and develop bioenergy plants (BUU) of the new generation" Ukrainian Academy of Agrarian Sciences. Institute of Livestock Mechanization. (IMZH), Zaporozhye, 1998.
5. Movses G., Pavlichenko V., Yagudin L. Technological regulation of the set of equipment of the bioenergy plant K-P-9-1 for the anaerobic digestion of manure, TsNIPTIMEZH, Zaporozhye, 1989.

УДК 620.9:33

Использование комбинированной термофотовольтовой системы для автономного потребителя

В.В. Кувшинов¹, Е.Г. Какушина², Д.С. Здарьев³,
А.А. Михненко⁴, А.А. Дыгаль⁵.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²little@mail.ru, ³zdarev@gmail.com,
⁴mihnenko@gmail.com, ⁵digal@mail.ru

Статья поступила 30.04.2019 г.; после доработки 07.05.2019 г.

Аннотация

Рассматривается комбинированная солнечная установка на основе плоского теплового гелиоколлектора и тепло-фотовольтового коллектора на абсорбере, с кремниевыми фотоэлементами. Данная установка применена для электроснабжения проточного водонагревателя, расположенного в фитнес-центре. Расчеты показывают, что выработанную энергию возможно использовать с высоким КПД для непосредственной работы установки.

Ключевые слова: фотовольтовый модуль, электрообеспечение автономных потребителей, двухсторонние модули.

Using a combined thermophotovoltaic system for an autonomous consumer

V.V. Kuvshinov¹, E.G. Kakyshina², D.S. Zdaryev³, A.A. Mikhnenko⁴,
A.A. Dygal⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²little@mail.ru, ³zdarev@gmail.com, ⁴mihnenko@gmail.com, ⁵digal@mail.ru

Received 30.04.2019 y.; received in final form 07.05.2019 y.

Abstract

A combined solar installation based on a flat thermal solar collector and a thermal photovoltaic collector on an absorber with silicon photocells is considered. This installation is applied to power supply of the instantaneous water heater located in the fitness center. Calculations show that it is possible to use the generated energy with high efficiency for the direct operation of the installation.

Keywords: photovoltaic module, the electrical supply of Autonomous consumers, double-sided modules

Введение

Совместная генерация тепловой и электрической энергии в солнечных энергоустановках является одним из важных направлений развития солнечной энергетики. В настоящее время большинство фотовольтовых станций ориентированы на производство только электроэнергии, при этом в самом распространенном

кремниевом солнечном элементе КПД составляет около 15 % [1]. Более полное использование солнечной энергии возможно при полезном использовании тепла (когенерации электрической и тепловой энергии), поэтому предложенная работа является актуальной [1].

В России быстрыми темпами идет строительство жилых домов, оснащение их солнечными тепловыми установками не является уни-

версальным решением проблемы. Поэтому вопросы повышения эффективности энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии, несомненно, являются актуальными [2].

Актуальность работы обусловлена тем, что на основе использования солнечных энергетических установок возможна значительная экономия традиционных энергоресурсов и уменьшение экологических проблем, связанных с вредными выбросами продуктов сгорания топлив. В работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования жилого дома с использованием гелиоэлектрических установок. В работе разработаны необходимые элементы приемной поверхности, описаны возможности их применения для работы солнечной установки. Также разработана модель расчета электронагревателя (дублёра) для солнечной энергоустановки, необходимая для проведения конструкционных и проверочных расчетов.

Совместная эксплуатация фотоэлектрических установок и гелиоколлекторов с аккумуляторными станциями является одним из важных направлений развития солнечной энергетики [3]. В настоящее время большинство фотоэлектрических станций работают на общую энергосистему, не используя возможность аккумулирования электрической энергии.

Более полное использование солнечной энергии (преобразование для совместной выработки тепловой и электрической энергии) возможно при использовании промежуточной аккумуляторной станции. Применение фотоэлектрических и гелиотепловых установок открывает дополнительные возможности для повышения эффективности таких энергостанций.

Постановка задачи исследования

В работе была предложена и исследована комбинированная солнечная установка на основе плоского теплового гелиоколлектора и теплофотоэлектрического коллектора на абсорбере, которого автор расположил кремниевые фотоэлементы [4]. Увеличение эффективности работы установки происходит за счёт увеличения выработки электрической энергии солнечными элементами вследствие их охлаждения теплоносителем абсорбера, а увеличение суммарного коэффициента преобразования всей установки происходит при одновременной выработке тепловой и электрической энергии на приёмной поверхности абсорбера за счет преобразования различных длин волн солнечного спектра теп-

ловым абсорбером и солнечными элементами. В работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования солнечной установки разработана оптимальная схема когенерационной тепло-фотоэлектрической установки. Применение такой комбинации в солнечных установках позволяет сократить их себестоимость и расходы их производство.

Основным элементом систем солнечного теплоснабжения является солнечный коллектор, который представляет собой конструкцию способную поглощать большую часть солнечной радиации и передавать её жидкому или воздушному теплоносителю. Теплота, уносимая теплоносителями, представляет собой полезную энергию, которая либо аккумулируется, либо используется для компенсации тепловой нагрузки.

Проведенные исследования показали, что воздушное охлаждение фотоэлектрического модуля дает заметное улучшение выходных электрических характеристик. Использование нагретого воздуха существенно увеличивает общий КПД комбинированного коллектора. Результаты исследований, показали, что при помощи комбинированного теплофотоэлектрического модуля в 1,5 раза была увеличена выработка электрической энергии солнечными элементами [9]. Существенное увеличение КПД всей системы связано с использованием комбинированной установкой значительной части солнечного спектра излучения. Если тепловой коллектор использует, в основном, инфракрасную и ближнюю видимую часть, то кремниевые элементы используют фиолетовую и коротковолновую видимую часть спектра [10].

Температурное распределение по поверхности фотоэлектрического модуля для конкретной установки – величина постоянная. Измеряя освещенность, расход теплоносителя, температуры на входе и выходе в коллектор, по формуле (1) можно рассчитывать все характеристики этой системы.

$$P_{\text{КСК}} = S_{\text{КСК}} E_o \left(\frac{GC_p (T_{\text{вых}} - T_i)}{E_o} + \frac{1}{1 + f_{\text{КСУ}} \eta_o (1 - k(T_i - T_o))} \right) \quad (1)$$

где $S_{\text{КСК}}$ – полезная площадь комбинированной солнечной установки, заполненная солнечными элементами;

E_o – освещенность рабочей поверхности (Вт/м²);

G – расход теплоносителя (кг/с);

C_p – теплоемкость воды;

$T_{\text{вых.}}$ – температура на выходе из коллектора;

T_i – температура теплоносителя на входе в коллектор;

k – температурный градиент, зависящий от типа и конструкции фотопреобразователя (0,3–0,5 %/°C);

η_0 – КПД ФЭП при стандартных условиях (освещенность 1000 Вт/м², $T_0 = 25^\circ\text{C}$).

Результаты теоретических и экспериментальных расчетов

Для экономии электрической энергии за счет охлаждения необходимо было провести исследования солнечной установки. Исследования проводились в натурных условиях на территории лаборатории Возобновляемой энергетики Севастопольского государственного университета в Институте ядерной энергии и промышленности. Электрическая мощность исследуемой части термофотоэлектрической установки составляет 50 Вт [8], при максимальной освещенности 1000 Вт/м². При проведении экспериментов (ясный солнечный день) освещенность составляла около 900 Вт/м², [5] соответственно максимальная мощность установки составляла около 36 Вт. Экспериментальные значения вольт-амперных характеристик термофотоэлектрического модуля были получены при различных температурных показателях (см. графики на рис.1). На полученных характеристиках видно, что мощность фотоэлектрической части установки повышалась при более низких температурах теплоносителя. Температура теплоносителя соответствовала на верхнем графике $T=+20^\circ\text{C}$, на среднем $T=+35^\circ\text{C}$, на нижнем: $T=+55^\circ\text{C}$ [6].

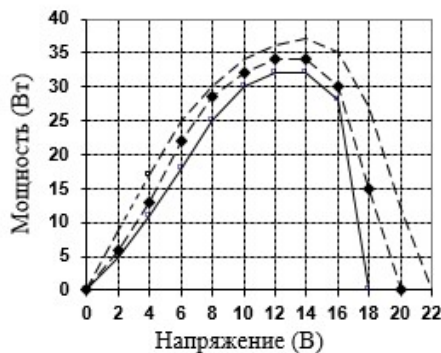


Рис.1. Исследование тепло-фотоэлектрической Установки.

Т.к. температура фотоэлементов приблизительно равна температуре теплоносителя, то изменение температуры теплоносителя изменяет и электрические мощностные характеристики всей установки. Согласно формуле (1) при температуре $+55^\circ\text{C}$, КПД и мощность падет на 15 % (т.к. $T_{\text{ФЭ}}=55^\circ\text{C}$, а $T_0=25^\circ\text{C}$), при температуре $+35^\circ\text{C}$, на 5 %, а при температуре $+20^\circ\text{C}$, [6] возрастает на 2,5%. Результаты экспериментов приблизительно соответствуют этим расчетам (см. графики на рис. 2).

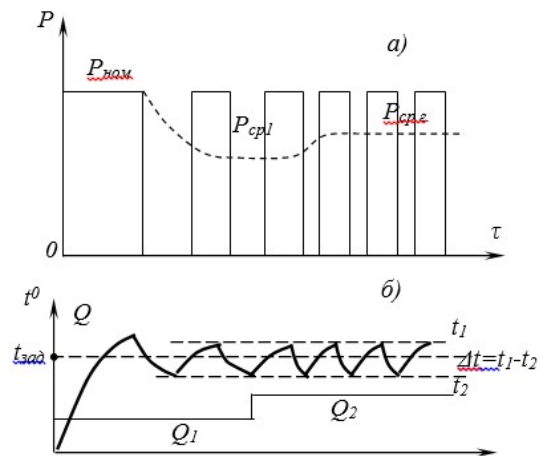


Рис.2. Графики изменения средней мощности при изменении расхода воды.

Как говорилось выше в проточном ВЭН температура на выходе как правило устанавливается равной 85°C .

Потребители же используют горячую воду для хозяйственных нужд с температурой $37\div 40^\circ\text{C}$, поэтому воду после проточного ВЭНа необходимо разбавлять до приемлемой температуры.

Объем горячей воды с температурой $t_2=85^\circ\text{C}$ можно определить из формулы (2):

$$V_2 = \frac{t_{\text{см}} \cdot V_{\text{см}} - t_1 V_1}{t_2}, \text{ литров } V_{\text{см}} = V_1 - V_2, \quad (2)$$

где t_1 – вода в водопроводе, принимают $t = 15^\circ\text{C}$.

$t_{\text{см}}$ – температура смеси, обычно 37°C .

Используя приведенные формулы и зная $V_{\text{смеси}}$, легко определить V_2 или расход через проточный ВЭН.

Другой способ определения V_2 с помощью номограммы предлагает. Данные расхода воды

для гигиены персонала предложены [1] (промышленная гигиена) в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные характеристики солнечной установки

Наименование	Температура воды, °С	Объем воды, л	Оптимальное время, мин.	Примечание
Ванны	40	125-150	10-15	
Душевые	37	25-45	10-15	
Умывальники	37	3-5	5	
Стирка:				
Мужчины	37	5-10	10	
Женщины	37	10-15	15	

В фитнес центре установлено 2 душевых кабины. Произвести расчет проточного ВЭН, если t_2 на выходе ВЭН = 85 °С.

Решение:

1. Считаем в первом приближении, что все рожки в кабинках работают одновременно. Время помывки определяется из таблицы $\tau = 15$ мин., а расход воды 30 литров.

2. Находим расход смеси при $t_{см} = 37$ °С:

$$\Sigma V_{см} = \frac{V \cdot 22}{15} = \frac{30 \cdot 2}{15} = 4 \text{ л/мин.} \quad (3)$$

3. Из номограммы находим расход воды через ВЭН:

$$V_2 = 1,4 \text{ л/мин} = 1,4 \cdot 60 = 84 \text{ л/час.} \quad (4)$$

4. Находим $P_{эн}$ по формуле:

$$P_{эн} = \frac{CV_2 \gamma (t_2 - t_1) 0,00028 \cdot k_3}{\eta} = \frac{4,2 \cdot 84 \cdot 0,998 \cdot 70 \cdot 0,00028 \cdot 1,1}{0,97} = 7,8 \text{ кВт} \quad (5)$$

Так как один термофотоэлектрический модуль вырабатывает 36 Вт мощности, то для рассматриваемого водонагревателя необходимо 216 модулей, что вполне реально и выгодно с экономической точки зрения. При использовании тепловой части установки можно ещё значительно поднять эффективность использования всей системы. Т.к. установка солнечного горячего водоснабжения (УСГВ) предназначена непосредственно для прямого преобразования

солнечной радиации в тепловую энергию за счет нагрева теплоносителя со значительно более высоким КПД, чем у фотопреобразователей (ФЭП) (оптический КПД УСГВ более 70% против 15 % у ФЭПов), то и соответственно количество комбинированных модулей возможно сократить более чем в 5 раз, т.е. до 45 штук. Следовательно себестоимость комбинированной тепло-фотоэлектрической солнечной установки можно значительно сократить и для нужд горячего водоснабжения [7] (при использовании, например проточных электронагревателей) значительно поднять эффективность всей системы УСГВ.

Выводы

Приведенные экспериментальные данные показывают, что регулирования температурного режима может значительно увеличивать выработку фотоэлектрической части установки (по результатам экспериментов в полтора раза).

Расчеты электрического проточного водонагревателя показывают, что выработанную энергию возможно использовать с высоким КПД для непосредственной работы установки.

Внедрение предложенных установок для южных регионов России может дать значительную экономию традиционных топливных ресурсов и улучшить экологическую обстановку.

Для нужд горячего водоснабжения использование тепло-фотоэлектрической установки позволяет значительно сократить потребляемую электрическую мощность и более эффективно использовать солнечные гелиоустановки и значительно увеличить их суммарный КПД.

Список литературы

1. Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Повышение энергетических характеристик солнечных установок при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2017. № 2(194). С.46-51.
2. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей / В.В. Кувшинов, Какушина Е.Г., Чванова Д.А. // Энергетические установки и технологии / Севастополь: Сев ГУ. – 2016. _ т. 2 - № 1. – С. 3-12.
3. Кувшинов В.В., Какушина Е.Г. Увеличение суммарного коэффициента преобразования за счет комбинированной выработки тепловой и электрической энергии / Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. № 2. С.61-67.

4. Стребков, Д.С., Пенджиев, А.М., Мамедсахатов, Б.Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане: Монография. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012, 496 с.
5. Кувшинов В.В., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Кукушкин Д.Ю., Савкин А.В. Возможности повышения мощности фотоэлектрических преобразователей модификацией их поверхностей нанокластерами серебра // Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2018. № 1(43). С.36-42.
6. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).
7. Кувшинов В.В. Исследование режимов работы термофотоэлектрических установок/ Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Парахнич С.А., Буланов А.И. // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 95-99.
8. Кувшинов В.В. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей /Е.Г. Какушина, Д.А. Чванова// Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 1. С. 62-67.
9. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
10. Кувшинов В.В. Использование термофотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горечкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
- B.D. Solar energy development in Turkmenistan: Monograph. M.: GNU VIESH, 2012, 496 p.
5. Kuvshinov V.V., Crete B.L., Morozova N.V., Kuvshinov D.Yu., Savkin A.V. Possibilities of increasing the power of photoelectric converters by modifying their surfaces with silver nanoclusters // Vector science of Togliatti State University, 2018. No. 1 (43). С.36-42.
6. Photovoltaic devices made of crystalline silicon. Methods for correcting the results of measuring current-voltage characteristics (IEC 891-87): GOST 28976-91. - [Enter April 19, 1991]. - M.: IPK Publishing house of standards, 2004. - 42 p. - (National Standard of Russia).
7. Kuvshinov V.V. Investigation of operating modes of thermophotovoltaic installations / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina., S.A. Parakhnich, A.I. Bulanov // Power Plants and Technologies. 2018. T. 4. No. 1. P. 95-99.
8. Kuvshinov V.V. Use of photovoltaic plant to ensure the smooth operation of Autonomous consumers / E. Kakushina, D. Chvanova // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 1. pp. 62-67.
9. Kuvshinov V.V. Opportunities to improve the energy characteristics of solar plants in the production of thermal and electrical energy from one receiving surface / E. Kakushina // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 45-50.
10. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic plants to provide thermal and electrical energy of Sevastopol / E. Kakushina, A. Vasiliev. A. Goreckii // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 51-57.

References

1. Kuvshinov V.V., Morozova N.V. Improving the energy characteristics of solar installations with the combined generation of heat and electrical energy // News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Technical Sciences. 2017. T. 2 (194). P.46-51.
2. The use of a photovoltaic plant to ensure the smooth operation of autonomous consumers / V.V. Kuvshinov, Kakushina EG, Chvanova DA. // Power plants and technologies / Sevastopol: Sev GU. - 2016. _ T. 2 - No 1. - p. 3-12.
3. Kuvshinov V.V., Kakushina E.G. Increasing the total conversion coefficient due to the combined generation of heat and electric energy / Electrical equipment: operation and repair. 2017. No. 2. P.61-67.
4. Strebkov, D.S., Pendzhiev, A.M., Mamedsakhmatov,

УДК 620.9:33

Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя

В.В. Кувшинов¹, Е.Г. Какушина², В.В. Кувшинова³,
О.У. Аджиев⁴, К.Ю. Бердышев⁵.

ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²little@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com,
⁴adjiev2@gmail.com, ⁵berdishev@mail.ru

Статья поступила 06.05.2019 г.; после доработки 15.05.2019 г.

Аннотация

Проведены исследования режимов работы фотоэлектрических модулей, используемых для зарядки аккумуляторных батарей в солнечных установках. Вся система предназначена для электрообеспечения автономных потребителей. Для увеличения мощностных характеристик установки предлагается использование солнечных концентраторов.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, электрообеспечения автономных потребителей, двухсторонние модули

Experimental study of the energy characteristics of solar installations in the region of Sevastopol

V.V.Kuvshinov¹, E.G. Kakyshina², V.V.Kuvshinova³, O.Y. Adzhiev⁴,
K.Y. Berdyshev⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²little@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴adjiev2@gmail.com,
⁵berdishev@mail.ru

Received 06.05.2019 y.; received in final form 15.05.2019 y.

Abstract

Describes the study of modes of operation of the PV modules used for battery charging in solar installations, the entire system is design to supply Autonomous consumers. To increase the power characteristics of the installation proposes the use of solar concentrators.

Keywords: photovoltaic module, the electrical supply of Autonomous consumers, double-sided modules.

Введение

Россия технически развитое государство, в котором можно быстро наладить, как производство солнечных элементов и тепловых абсорбиров, так и производство фотоэлектрических и тепловых солнечных установок. Используя практические рекомендации, можно с определённой уверенностью показать какие энергетические параметры будет вырабатывать солнеч-

ная батарея или гелиоколлектор в тех или иных погодных условиях [1]. В этой работе показаны результаты исследований по изучению работы фотоэлектрических модулей и гелиоколлекторов. Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной площадке кафедры «Возобновляемых источников энергии электрических сетей и систем» Севастопольского государственного университета Института ядерной энергии и промышленности, в течение

2018 года и 2019 года. Для исследований использовались два типа фотоэлектрических модулей [2] для автономных и сетевых солнечных электростанций. Первый это модуль ISM-50, который устанавливается на автономных солнечных станциях, второй модуль PS-250, устанавливаемый на электрических солнечных станциях, работающих параллельно с сетью. Модуль ISM-50, состоит из монокремниевых элементов и имеет КПД 15 %, модуль PS-250 состоит из поликремневых элементов с КПД близким 15-17 %.

Постановка задачи исследования

Главной целью данного исследования было получение зависимостей изменения выходной мощности фотоэлектрической батареи в разные месяцы года. Ключевым этапом, на наш взгляд, является этап исследования и обоснования актуальности применения данных установок.

Исследования проводились на открытой территории в ясные солнечные дни при постоянной освещенности [3,4]. На графиках (рис. 1, 2, 3, 4) и в табл. 1 приведены усредненные вольтамперные и мощностные характеристики, полученные при испытаниях за 2018 - 2019 года.

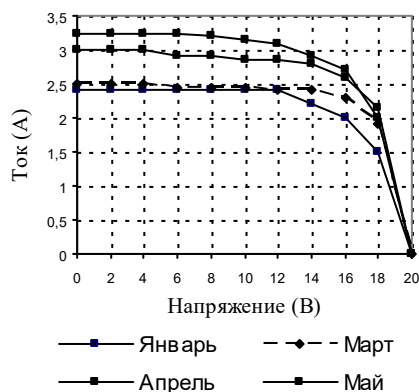


Рис.1. Вольтамперная усредненная характеристика модуля ISM-50 (данные получены при температурах около 15 °С, и различных освещенностях).

Значения номинальной мощности заводских измерений модуля ISM-50 соответствуют значениям 17 В и 3 А.

Однако при натурных испытаниях значение напряжения в рабочей точке с увеличением освещенности в весенние месяцы падает до 16-14 В (рис 1, 2, 3, 4), при этом мощностные характеристики сохраняются, а значения тока растут сильнее, чем по результатам заводских испытаний [5,6].

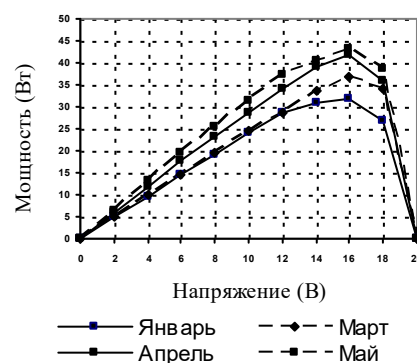


Рис. 2. Мощностная усредненная характеристика модулей ISM-50 (данные получены при температурах около 15 °С, и различных освещенностях).

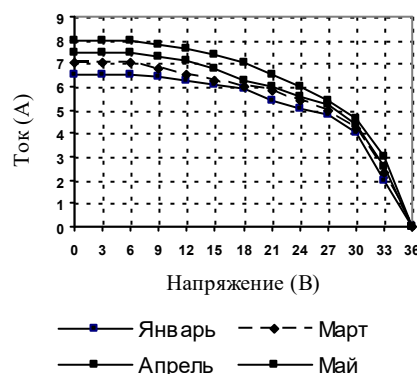


Рис.3. Вольтамперная усредненная характеристика модулей PS-250 (данные получены при температурах около 15 °С, и различных освещенностях).

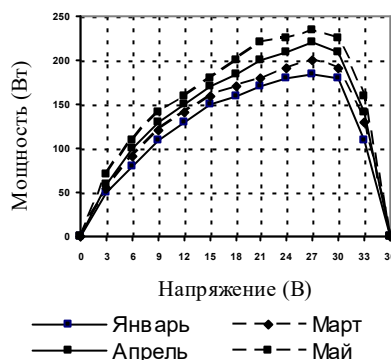


Рис.4. Мощностная усредненная характеристика модулей PS-250 (данные получены при температурах около 15 °С, и различных освещенностях).

Коэффициент преобразования солнечных элементов модуля ISM-50 рассчитываем, используя заводские данные и формулы 1 и 2.

Коэффициент преобразования солнечной батареи (табл. 1), различается в разные месяцы.

Так в январе он наибольший, а в мае наименьший [7].

Таблица 1. Средние значения основных характеристик модуля ISM-50

Месяцы	Мощность падающего излучения (освещенность), Вт/м ²	Температура воздуха °C	Максимальная мощность модуля ISM-50	Коэффициент преобразования модуля солнечных элементов ISM-50
Январь	640	10	32 Вт	14,2 %
Март	740	12	36,8 Вт	14 %
Апрель	850	13	41,6 Вт	13,8 %
Май	900	15	43,2 Вт	13,6 %

. На графиках рис.5 видно, что при одинаковых значениях освещенности, мощность модуля была большей при низких температурах, также менялась форма вольт-амперной характеристики.

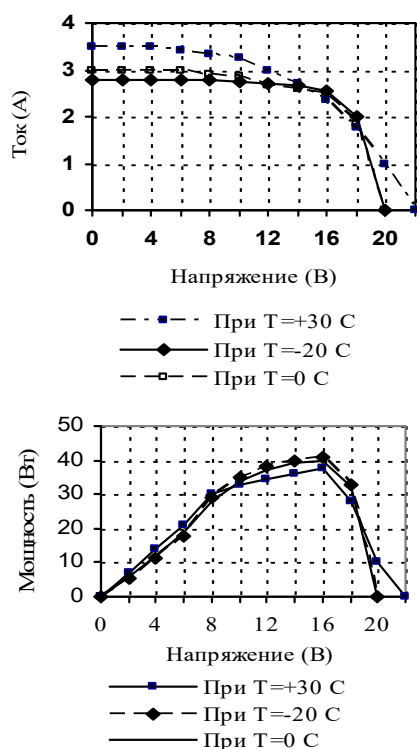


Рис.5. Зависимости вольт-амперной и мощностной характеристик модуля ISM-50 полученные в

разное время года при одинаковой освещенности (около 820 Вт/м²) и различной атмосферной температуре.

Экспериментальные значения вольт-амперных характеристик модуля были получены при различных температурных показателях. Коэффициент преобразования модуля, в зависимости от освещенности, улучшается в холодную ясную погоду, особенно эффективно работал модуль в январе при $T = -10^{\circ}\text{C}$, и снижается в летние месяцы при повышении температуры рабочей поверхности. Как видно из результатов, наилучший режим работы модуля наблюдался при отрицательных температурах (например -10°C , январь 2019).

Холодная температура воздуха положительно сказывается на работе модуля, причем хорошо видно увеличение коэффициента преобразования модуля, в отличие от плюсовых температур.

В условиях облачности (освещенность менее 200 Вт/м²), зависимость мощностных характеристик модуля от угла наклона меняется по другим характеристикам (график на рис.6).

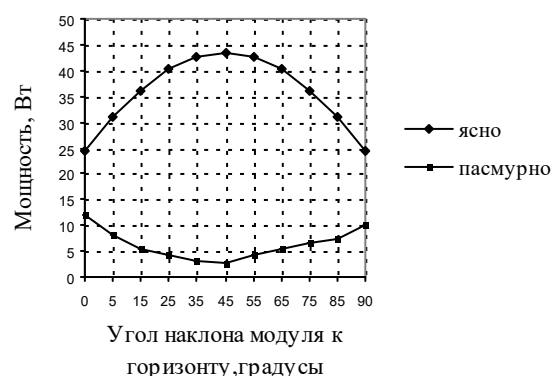


Рис.6. Изменение мощности модуля ISM-50, в зависимости от угла наклона при различной облачности.

При отклонении плоскости модуля от перпендикулярного направления на точку, в которой находится Солнце, фототок и вырабатываемая мощность начинают расти, и достигают своего максимума при горизонтальном расположении модуля. Это происходит в момент, когда солнечный диск полностью закрыт облаками и модуль преобразовывает только рассеянное излучение, приходящее со всех сторон небосвода [5,8]. При высокой облачности угол установки модуля к горизонту составляет 0° , при ясной погоде, наоборот, угол установки плоскости модуля соответствовал направлению на Солнце, т.е. равнялся углу солнечного склонения. При этом, при равной освещенности ко-

эффект преобразования модуля был выше в ясную погоду, чем при высокой облачности (табл.2), т.е. на работу модуля влияет спектр солнечного излучения, который различен в пасмурную и ясную погоду [5].

Также необходимо отметить резкое повышение мощности (более 10%) при небольшой облачности, при выходе Солнца из-за облака. Повышение мощности наблюдалось около 1-2 минут, затем мощность снижалась до значения соответствующего постоянной освещенности для ясной погоды. Повышение мощности связано с увеличением освещенности, которая при небольшой облачности в некоторых точках земной поверхности может быть выше, за счет суммирования прямого и отраженного от облаков потока солнечной радиации [5,6].

Таблица 2. Характеристики модуля ISM-50 в ясную и пасмурную погоду

Облачность	Угол установки модуля при максимальной освещенности	Максимальная освещенность рабочей поверхности, Вт/м ²	Коэффициент преобразования
Ясно	45 °	880	14 %
Пасмурно	0 °	280	12 %
Переменная облачность	45 °	От 550 до 880, с увеличением до 980	Около 13 %

Представляет интерес зависимость при работе модуля при наличии снегового покрова (рис.7).

Значительное увеличение мощности происходило при отражении света от снежного покрытия, т.е. при увеличении альбедо. При этом освещенность составляла более 900 Вт/м², что в этом месяце даже в ясную погоду не наблюдается. Однако за счет отражения света от поверхности снегового покрова прибавка в освещенности составляла до 30%.

При этом модуль вырабатывал меньшую мощность, чем при такой же освещенности без снегового покрова. Это можно объяснить отличной спектральной составляющей отраженного от снегового покрова света, которая хуже

преобразовывается модулем [5,9]. На графиках (рис. 4.4) заметно увеличение мощности модуля за счет отраженного потока от снеговой поверхности, однако коэффициент преобразования падает.

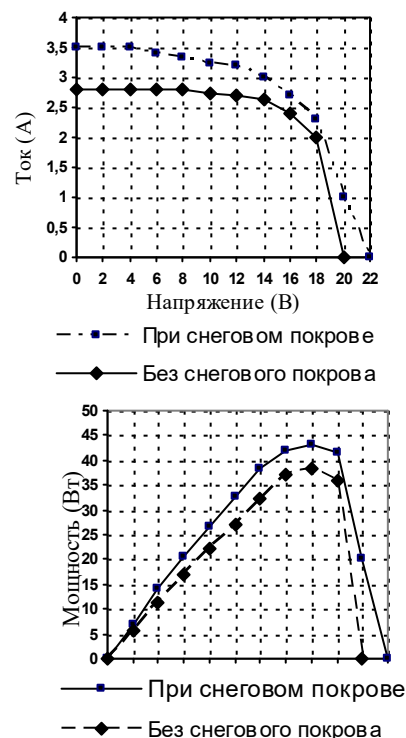


Рис.7. Вольт-амперные и мощностные характеристики полученные при наличии снегового покрова (мощность падающего солнечного излучения 770 Вт/м²).

Таблица3. Характеристики модуля ISM-50 при наличии снегового покрова

Снеговой покров	Мощность падающего излучения, Вт/м ²	Суммарная освещенность модуля, Вт/м ²	Температура воздуха °С	Номинальная мощность модуля ISM-50, Вт	Кэф. Преобразования, %.
При наличии снегового покрова	770	925	- 5	43,2	13,2
Без снегового покрова	770	770	- 5	38,4	14,1

Данные, полученные в работе необходимы при расчетах годовой выработки электроэнергии солнечными электростанциями [6,10]. Как видно из данных, конечные значения выработки электроэнергии, при учете указанных в данной работе факторах, могут различаться более, чем на 30%, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Экспериментальные исследования работы гелиоколлекторов с целью повышения эффективности их использования

Невысокий термический потенциал солнечной энергетики определяет более высокие требования к эффективности систем солнечного теплоснабжения и к методам определения основных параметров эффективности как установок теплоснабжения в целом, так и главных элементов таких установок – абсорберов плоских солнечных коллекторов [10,11].

По данным, полученным в результате проведения экспериментов, можно установить какой тип абсорбера является более эффективным для систем отопления или горячего водоснабжения.

Исследования проводились на базе кафедры «ВИЭЭСС» Севастопольского гос. университета института ядерной энергии и промышленности на открытой территории. Теплоносителем в гелиоколлекторах являлась пресная вода [3,11]. Целью данного исследования являлось получение зависимостей изменения выходной мощности и коэффициента преобразования тепловой энергии (КПТЭ) гелиоколлекторов в течение суток. На рис. 8 и 9 приводятся результаты исследований для гелиоколлектора со штампованным стальным абсорбером (коллектор 1), гелиоколлектора с латунным абсорбером типа «труба в листе» с незачерненной поверхностью (коллектор 2) и гелиоколлектора с абсорбером с зачерненным покрытием, изготовленным из алюминиевого профиля и медных трубок (коллектор 3).

На графике (рис.8) приведены зависимости температур на входе и выходе из гелиоколлектора от времени по показаниям термодатчиков. На графике (рис.9) представлена зависимость выходной мощности коллекторов от времени.

Из рис.8 видно, что в период 10:25 – 10:40 происходит первичный нагрев теплоносителя (резкий подъем кривых). Далее температура возрастает плавно, как до выхода на номинальный режим работы (граница в 12:10), так и в

номинальном режиме. Из рис.9 видно, что выходная мощность гелиоколлектора (мощность солнечного излучения, переданная теплоносителю) резко повышается в начале работы, а далее плавно достигает своего максимума в 12:55, через 2 часа 35 минут работы.

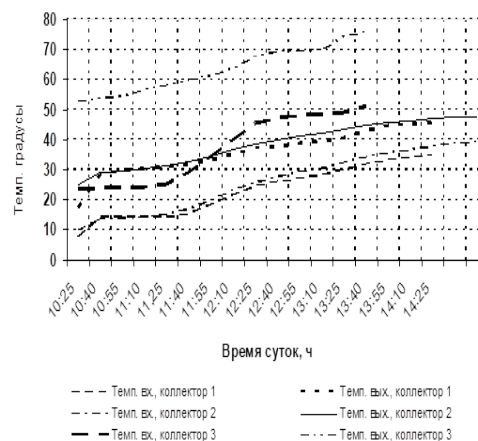


Рис.8. Зависимость температур теплоносителя на входе и выходе из коллектора (в °C) от времени суток (ч).

При анализе характеристик различных типов гелиоколлекторов [3,4], можно сделать вывод о возможности применения коллекторов данного типа для систем отопления, горячего водоснабжения, а также комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. В частности, для систем отопления температура воды на выходе должна достигать значений около 90°C, для систем горячего водоснабжения 55°C - 65°C, для комбинированных теплофотоэлектрических абсорберов около 40°C.

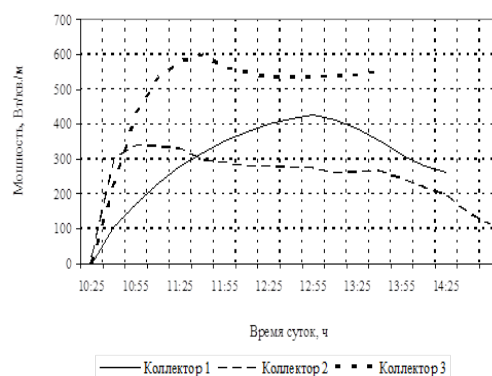


Рис.9. Зависимость выходной мощности от времени.

Производство тепловой энергии за счет гелиоколлекторов является экологически чистым, дает возможность при их использовании

уменьшить вред, наносимый окружающей среде при сжигании органических видов топлив [8].

Увеличение эффективности работы при совместном использовании фотоэлектрических и гелиотепловых установок

В мае-июне 2018 года были проведены исследования работы теплового гелиоколлектора с принудительной циркуляцией [3].

В качестве электрического генератора для питания циркуляционного насоса использовался фотоэлектрический модуль ISM-50. Внешний вид экспериментального стенда показан на рис.10.



Рис.10. Установка в работе (Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, территория кафедры Энергосбережение и нетрадиционные источники энергии).

С точки зрения классификации гелиотехнических источников энергии стенд моделирует установку солнечного горячего водообеспечения (УСГВ) с принудительной циркуляцией с автономным фотоэлектрическим источником электрической энергии.

На стенде исследовался плоский солнечный коллектор типа «лист-труба», трубная система и абсорбер – алюминиевые, габаритные размеры коллектора: 1,6 х 0,55 м х 0,1 м, площадь – 0,88 м², коллектор имеет одностекольное защитное покрытие. Результаты экспериментов представлены в таблице 4.

Результаты эксперимента дают возможность исследовать работу фотоэлектрического источника питания совместно с тепловым коллектором при одинаковых климатических ха-

рактеристиках, постоянной освещенности и атмосферной температуре.

Таблица 4. Экспериментальные характеристики солнечной установки

Параметр	Измерения		
	1	2	3
T_1 °C	22,5	29,6	34,2
T_2 °C	28	34,7	39,7
T_3 °C	22	22	22
G (кВт/м ²)	0,0092		
C_p (Дж/кг К)	4190		
$Q_u = GC_p(T_2 - T_1)$	212	193	212
I_T (Вт/м ²)	677	700	700
η	0,36	0,27	0,29
Время суток	11.00	12.00	13.00

Выводы

На основе натурных исследований, проведенных при различных климатических условиях, получены данные о наиболее эффективных режимах работы серийных фотоэлектрических модулей ISM-50 и PS-250, показано изменение КПД модулей, полученное при исследованиях их работы при различных атмосферных температурах от -10°C и до +30°C [10].

Видно увеличение электрических мощностных характеристик модулей при низких температурах рабочей поверхности при высокой освещенности.

Согласно проведенным исследованиям промышленных плоских гелиоколлекторов, с разныи типами абсорберов из различных материалов, разработаны рекомендации, какой тип абсорбера наиболее эффективно применять для конкретных целей воздушного отопления, водяного отопления или горячего водоснабжения. [5].

При комбинированной выработки тепловой и электрической энергии видно заметное увеличение суммарного КПД всей установки.

Список литературы

1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
2. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев Перспективы фотоэлектрического метода преобразования сол-

- нечной энергии. \ Под ред. Н.Н. Семенова. Черноголовка: Изд. ИХФ АН СССР, 1981.
3. Кувшинов В.В. Исследование режимов работы термофотоэлектрических установок/ Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Парахнич С.А., Буланов А.И. // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 95-99.
 4. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
 5. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов / Колтун М. М. – М.: Наука, 1985. – 300 с.
 6. Франтишек Я. Энергия настоящего и будущего / Я. Франтишек// Монография. 2014.С.111-113
 7. Кувшинов В.В. Изменение мощностных характеристик фотоэлектрических установок при различных климатических факторах / Кувшинов В.В. // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. № 2. С. 61-66.
 8. Кувшинов В.В. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей /Е.Г. Какушина, Д.А. Чванова// Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 1. С. 62-67.
 9. Кувшинов В.В. Использование термофотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
 10. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Е.Г. Какушина, Д.Д. Смирнова // Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 1. С. 47-50.
 11. Кувшинов В.В. Прозрачные защитные покрытия для комбинированных солнечных установок/ Е.Г. Какушина, Косий А.Г.// Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.
 - gy characteristics of solar plants in the production of thermal and electrical energy from one receiving surface / E. Kakushina // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 45-50.
 5. Koltun M.M. Optika i metrologia solnechnih elementov [Optics and Metrology of solar cells]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 300 p.
 6. Frantisek J. Energy of the present and future / J. Frantisek // Monograph. 2014. P.111-113
 7. Kuvshinov V.V. Change in power characteristics of photo-electric installations at various climatic factors / V.V. Kuvshinov // Power plants and technologies. 2017. Т. 3. No. 2. P. 61-66.
 8. Kuvshinov V.V. Use of photovoltaic plant to ensure the smooth operation of Autonomous consumers / E. Kakushina, D. Chvanova // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 1. pp. 62-67.
 9. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic plants to provide thermal and electrical energy of Sevastopol / E. Kakushina, A. Vasiliev. A. Goreckii // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 51-57.
 10. Kuvshinov V.V. Investigation of seasonal operation of industrial photovoltaic module PS 250/ E. Kakushina, D. Smirnova // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 1. pp. 47-50.
 11. Kuvshinov V.V. Transparent protective coating for a combined solar installations / E. Kakushina, A. Kocii // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 3. pp. 73-78.

References

1. Rauschenbach G. Spravochnik po proektirovaniu colnechnix batarei [Guide for the design of solar panels], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 397 p.
2. Alferova J.I. Ptpspektivi fotoelektricheskogo metoda preobrazovania solnechnoi energii. ICPAS USSR, Publ., 1981.
3. Kuvshinov V.V. Investigation of operating modes of thermophotovoltaic installations / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina., S.A. Parakhnich, A.I. Bulanov // Power Plants and Technologies. 2018. Т. 4. No. 1. P. 95-99.
4. Kuvshinov V.V. Opportunities to improve the ener-

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК.550.837.3

Мембранные технологии водоподготовки в энергетике

А.М. Акимов, С.А. Котельникова

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail: cvetlana.83@inbox.ru

Статья поступила 26.04.2019 г.; после доработки 13.05.2019 г.

Аннотация

Быстрый рост использования мембранной технологии систем водоподготовки замкнутого водооборота (АЭС, ТЭС), очистки сточных вод, появление на рынке альтернативных производителей соответствующего оборудования и, что особенно важно, взаимозаменяемых комплектующих, а также постепенное снижение цен на расходные материалы, в частности на мембранные модули, – все это позволяет считать мембранные технологии перспективными методами водоподготовки.

Ключевые слова: мембранные технологии, ультрафильтрация, мембранная очистка, обратный осмос, пермеат, ионный обмен.

Membrane water treatment technologies in power

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova

Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russia e-mail: cvetlana.83@inbox.ru

Received 26.04.2019 y.; received in final form 13.05.2019 y.

Abstract

The rapid growth in the use of membrane technology of closed-loop water treatment systems, wastewater treatment, the emergence of alternative manufacturers of appropriate equipment and, most importantly, interchangeable components, as well as a gradual reduction in prices for consumables, in particular membrane modules – all this allows us to consider membrane technology promising methods of water treatment.

Keywords: membrane technologies, ultrafiltration, membrane cleaning, reverse osmosis, permeate, ion exchange.

Введение

Внедрение мембранной технологии помогает решить задачу сокращения эксплуатационных расходов на водоподготовку.

Данная задача усложняется ростом тарифов на водопользование, непрерывным ухудшением качественных показателей воды (например, увеличением минерализации) в источниках, пригодных для промышленного использования, ужесточением нормативов по количественным и качественным показателям для сбрасываемых

сточных вод, повышением требований к качеству обработанной воды, используемой в технологическом цикле.

Сегодня наиболее передовые решения в водоподготовке осуществляются с применением мембранной технологии, с помощью мембран, которые пропускают воду и задерживают примеси, можно наиболее просто, экологично и эффективно изменять состав и свойства воды, добиваясь выполнения требований к чистоте продукта.

Современные мембранные технологии очистки воды отличаются высокой селективно-

стью, низкими энергозатратами, простотой аппаратного оформления, служат основой создания безотходных технологий.

Постановка задачи

Рассмотреть и сравнить существующие технологии водоподготовки с перспективными мембранными методами.

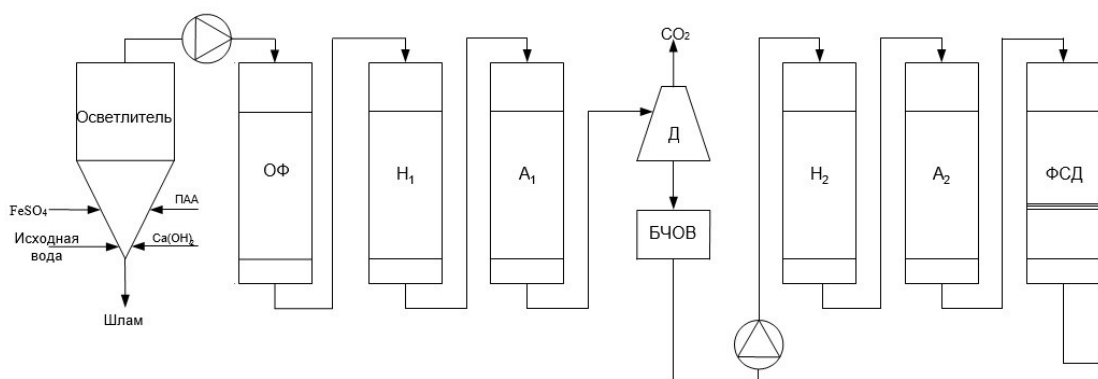


Рис. 1. Типовая схема ВПУ.

В состав цепочки ВПУ входит следующее оборудование: осветлитель, насосы, осветлительный фильтр (ОФ), катионитовый фильтр первой ступени (H_1), анионитовый фильтр первой ступени (A_1), декарбонизатор (Д), бак частично осветленной воды (БЧОВ), катионитовый фильтр второй ступени (H_2), анионитовый фильтр второй ступени (A_2), фильтр смешанного действия (ФСД), контрольные баки.

Как правило, на АЭС в фильтровальном зале располагаются от трех до пяти цепочек. Оборудование ВПУ размещается в фильтровальном зале и занимает от 600 до 1000 м².

Деминерализация воды ионным обменом позволяет почти полностью обессолить ее.

Однако, применение данного метода выявило наличие недостатков: необходимость регенерации, громоздкое и дорогое оборудование, высокая стоимость ионитов и другие. В связи с этим, быстрое распространение получили баромембранные методы обработки воды.

Баромембранные методы включают в себя микрофильтрацию, ультрафильтрацию, нанофильтрацию. В их основе этих лежит метод обратного осмоса, который возник в 1953 г., когда Рейдом и Бретоном (США) были открыты свойства полупроницаемых ацетилцеллюлозных мембран.

Сущность мембранных методов очистки воды объясняется на рис. 2 и 3.

В состав водоподготовительных установок (ВПУ), действующих на большинстве атомных электростанциях (АЭС) и тепловых электростанций (ТЭС) России входят различные аппараты в определенной последовательности в зависимости от выбранной схемы и области их преимущественного использования.

Типовая схема ВПУ представлена на рис. 1.

Сущность метода обратного осмоса заключается в следующем: если растворитель и раствор разделить полупроницаемой перегородкой, пропускающей только молекулы растворителя, то растворитель начнет переходить через перегородку в раствор до тех пор, пока не произойдет выравнивание концентрации растворов по обе стороны мембраны.

Процесс самопроизвольного перетекания веществ через полупроницаемую мембрану, разделяющую два раствора различной концентрации, называется осмосом (от греческого: *osmos* – толчок, давление).

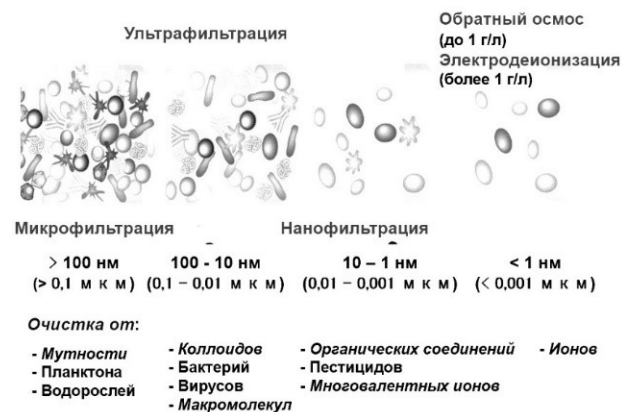


Рис. 2. Спектр фильтрации

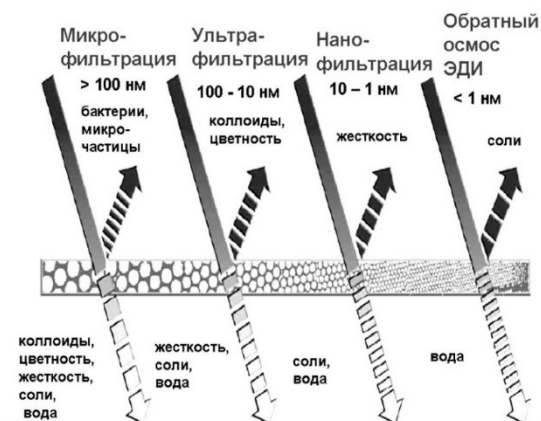


Рис. 3 Классификация методов очистки воды, в основе которых лежит обратный осмос.

Если над раствором создать противодействие, скорость перехода растворителя через мембрану уменьшится.

При установлении равновесия, отвечающее ему давление может служить количественной характеристикой явления обратного осмоса.

Применительно к системам водоподготовки, где растворителем является вода, процесс обратного осмоса можно представить следующим образом: если со стороны протекающей через аппарат природной воды, с некоторым содержанием примесей, приложить давление, превышающее осмотическое, то вода будет просачиваться через мембрану и скапливаться по другую ее сторону, а примеси – оставаться с исходной водой, их концентрация будет увеличиваться.

Существует несколько гипотез, объясняющих явление обратного осмоса. К ним относятся: ситовая гипотеза, энергетическая гипотеза, капиллярно-фильтрационная (сорбционная) гипотеза.

Рассмотрим принципиальную схему ВПУ на базе мембранных технологий.

Вместо громоздкой системы предварительной очистки природной воды, включающей в состав осветлитель, механические фильтры, узлы коагулянта, флокулянта, известкового молока, в технологии обратного осмоса используется микро-и ультрафильтрация (рис. 4).

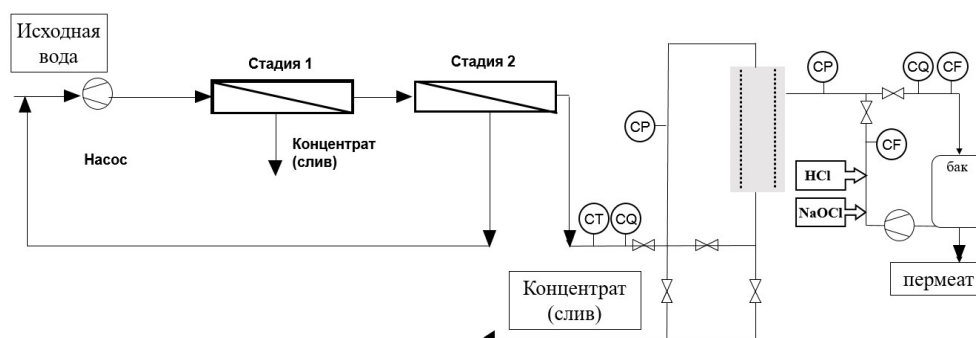


Рис.4. Принципиальная схема микро- и ультрафильтрации.

Цепочку обессоливания, состоящую из семи-восьми громоздких ионитовых фильтров, заменяет блок модулей обратного осмоса (рис.5).

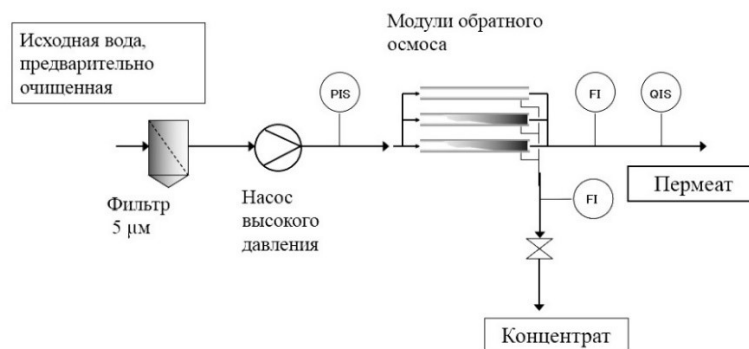


Рис. 5. Принципиальная схема установки с модулями обратного осмоса.

В качестве финишной очистки глубоко обессоленной воды используется фильтр смешанного действия, загруженный смесью катионита и анионита в соотношении 1:3.

На рисунке 6 представлены водоподготовительные установка на базе баромембранных технологий.

Основные схемы с применением мембран в энергетике показаны на рисунке 7.

В настоящее время водоподготовительные установки на базе баромембранных технологий

функционируют на предприятиях: Сочинская теплоэлектростанция (ТЭЦ), ТЭЦ-1 Орел, ТЭЦ-2 Калининград, Мосэнерго ТЭЦ, Южно-Украинская АЭС, Нововоронежская АЭС, Ленинградская АЭС, Шатурская государственная районная электростанция (ГРЭС), Волжская ГРЭС, Адлерская ТЭЦ, ООО Кока-кола Евразия, Севастопольская ТЭС, Криворожсталь, Рязанский нефтеперерабатывающий завод (НПЗ), Стирол, Одесский припортовый завод.

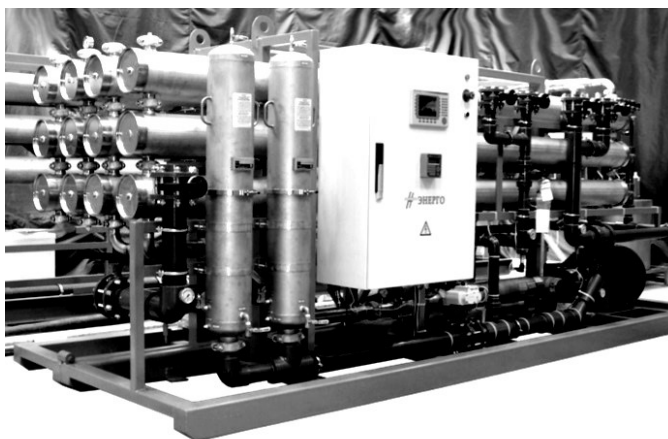


Рис. 6. Установка обратного осмоса в работе.

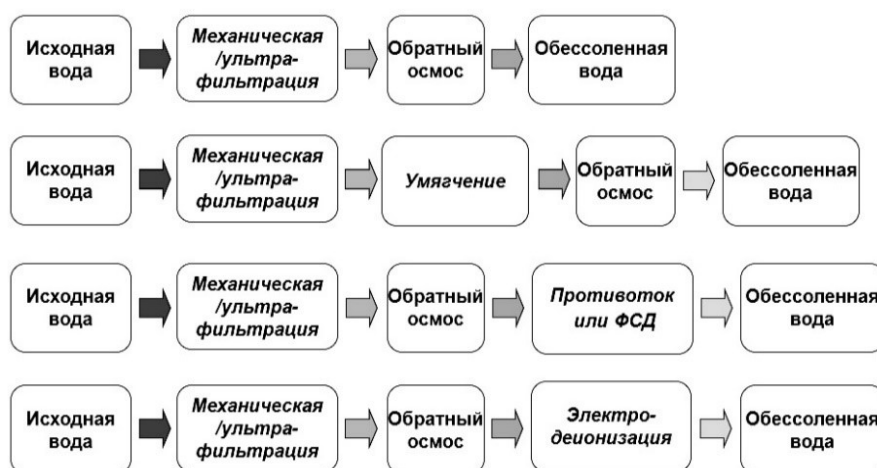


Рис. 7. Схемы водоподготовительных установок с применением мембран.

К преимуществам баромембранных технологий следует отнести:

- стабильно высокое и устойчивое качество водоподготовки;
- минимизация расхода реагентов;
- исключение образования высокоминерализованных сточных вод;
- высокая степень удаления из обрабатываемой воды неорганических и органических

соединений, кремниевой кислоты;

- отсутствие необходимости нейтрализации основного потока сточных вод;
- компактность;
- простота монтажа и эксплуатации;
- экономичность.

Наряду с достоинствами мембранных технологий обработки воды присущ и ряд недостатков. К ним можно отнести:

- обрастание мембран, вследствие оседания на поверхности органических соединений или биомасс;
- накипеобразование на мембранах – в результате конденсации солей происходит пресыщение растворов солей в концентрате и их выпадение в виде твердой фазы;
- деградация мембран – процесс гидролиза, биологические атаки, химическое растворение материала мембран.

Заключение

1. Рассмотрены основы перспективного метода водоподготовки с применением мембранных технологий.

2. Применение обратного осмоса бесспорно выгодно экономически при обессоливании вод свыше 300 мг/л, что показало строительство ВПУ на Ленинградской АЭС.

3. Применение обратного осмоса имеет несомненный приоритет при ограниченном времени строительства и в пределах ограниченных площадей.

4. Накопленный опыт позволяет сделать вывод о надежной работе установок обратного осмоса, особенно при правильно организованной системе предочистки.

Список литературы

1. Акимов А.М. Оборудование и материалы ядерных энергетических установок / А.М. Акимов, С.А. Федорова, С.А. Котельникова // СевГУ, Севастополь 2017г. – 138с.
2. Копылов А.С. Водоподготовка в энергетике / Копылов А.С., Лавыгин Р.М., Очков В.Ф. // Издательский дом МЭИ, 2006 – 309с.
3. Акимов А.М., Котельникова С.А. Специфика интегрированных мембранных технологий в сочетании с ионным обменом для целей водоподготовки. // Энергетические установки и технологии, 2018. – Т.4. - №3. – С. 86-91.
4. Справочник для профессионалов «Водоподготовка» под редакцией д.т.н. Беликова С.Е. // Аква-терм. 2007 – 239с.

References

1. Akimov A. M. Equipment and materials for nuclear power plants / A. M. Akimov, S. A. Fedorova, S. A. Kotelnikova // SevSU, Sebastopol, 2017. – 138 p.
2. Kopylov A. S.-water Treatment energy / Kopylov A. S., Lavygin R. M., Ochkov V. F. // MPEI Publishing house, 2006 – 309 p.
3. Akimov A. M., Kotelnikova S. A. The Specificity of integrated membrane technology in combination with ion exchange for water treatment purposes. //

Power plants and technologies, 2018. – Vol. 4. - №3. – P. 86-91.

4. A reference book for professionals «Water treatment» E. S. Belikov // Aqua-therm. 2007 – 239 p.

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 5 № 2**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 5 No 2**

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Адрес редколлегии:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyzhurnal@mail.ru
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова.*

Подписано к печати 28.06.2019. Изд. № 34/19. Зак. 33/19. Тираж 65 экз.
Объем 14,5 п.л. Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 14,21. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»