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. 4 № 4

Севастополь
2018

Э 651
УДК 621.311

ISSN 2413-5526

Э 651 **Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Т. 4. - № 4. – 128 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;
Тимощенко 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;
Магдыч 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.

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки 7

Качур С.А. Дистанционное управление мощностью разрушенных реакторов на основе кривизны пространства 7

Пухлий В.А., Соколов В.В., Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Пухлий К.В. Расчет на прочность рабочих лопаток центробежных насосов большой кривизны 12

Автоматизация процессов контроля и управления **22**

Качур С.А., Скидан А.А., Шахова Н.В., Аникевич К.П., Давиденко Е.Н. Диагностика состояния блоков ядерных энергетических установок на основе статистических методов 22

Пухлий В.А.,Мирошниченко С.Т.;Соколов В.В., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 1. Структурный подход к уравнениям движения 29

Широков И. Б., Марончук И. И. Исследования рабочих характеристик влагомера нефти и нефтепродуктов на основе СВЧ метода измерений 43

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии **50**

Вологдин С.В., Гурьев В.В., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.. Математическая модель оптимизации режима работы энергосистемы республики Крым и г. Севастополя 50

Какушина Е.Г., Якимович Б.А , Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н , С.И. Соломенникова П.Н. Технико-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем 55

Смирнов В.В., Старченко М.А., Максименко Т.С., Чернова Е.Ю., Кавун А.И. Технико-экономический анализ эффективности применения вставок постоянного тока в электроэнергетике 61

Электротехнические комплексы и системы **67**

Баланин А.Л., Гроль А.В., Гурин А.В., Крылов Д.А., Невиница В.А., Теплов П.С., Фомиченко П.А., Марова Е.В., Маслов А.М , Шепелев С.Ф Развитие многокритериальных подходов к оценке конкурентоспособности электростанций с атомным и неатомным энергоисточником 67

Качур С.А. Оптимизация распределения нагрузки в сети электроснабжения с перетоками и потерями мощности 83

Смирнов В.В., Кавун А.И., Максименко Т.С., Старченко М.А. Анализ использования компенсирующего устройства типа CHDB 202 в новых конфигурациях сети 88

Смирнов В.В., Кавун А.И. Сравнительный анализ волоконно-оптических преобразователей тока и напряжения и электромагнитных измерительных трансформаторов 92

Смирнов В.В., Лавренчук А.А., Максименко Т.С., Старченко М.А., Чернова Е.Ю. Сравнительный анализ целесообразности применения проводов с композитным сердечником и проводов традиционной конструкции 96

Смирнов В.В., Чернова Е.Ю., Старченко М.А., Максименко Т.С. Модели прогнозирования электрических нагрузок 103

Химические технологии **110**

Пономаренко П.А., Фролова М.А., Тананаев И.Г., Чичерина Ю.С. Об изотопном составе водорода и его трансформации в полях тепловых нейтронов в активных зонах реакторов типа ВВЭР 110

Черкашина Н.И. Конкурентная сорбция при очистке жидких технологических сред от ионов меди, свинца и железа 115

Черкашина Н.И., Ерофеев В.А. Выделение урана из технологических сред сорбентом на основе лигнина 121

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant **7**

Kachur S.A. Remote Control of the Power of Destroyed Reactors on the basis of Space Curvature 7

Pukhliy V.A., Sokolov V.V., Korneeva N.K., Pichugova L.N., Pukhliy K.V. Calculation on durability of working blades of centrifugal pumps of the big curvature 12

Process automation and control **22**

Kachur S.A., Skidan A.A., Shakhova N.V., Anikevich K.P., Davidenko E.N. Diagnostics of the State of Blocks Nuclear Energy Installations based on Statistical Methods 22

Pukhliy V.A., Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., Pukhliy K.V. Hydrodynamic acoustics. The message 1. The structural approach to the movement equations 29

Shirokov I. B., Maronchuk I. I. Performance studies of the moisture meter of oil and petroleum products based on the microwave measurement method 43

Alternative and renewable energy sources **50**

Vologdin C.V., Guryev V.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Mathematical model of optimization of operation modeenergy systems of the republic of Crimea and g. Sevastopol 50

Kakyshina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshjnov V.V., Kyznetsov P.N., Colomennikova C.I. Technical-economic aspects of development autonomous solar energy systems 55

Smirnov V.V., Starchenko M.A., Maximenko T.S., Chernova K.Yu., Kavun A.I. Technical and economic performance analysis of back-to-back high voltage direct current tie in power industry 61

Electrotechnical complexes and systems **67**

Balanin A.L., Grol A.V., Gurin A.V., Krylov D.A., Nevinitsa V.A., Teplov P.S., Fomichenko P.A., Marova E.V., Maslov A.M. , Shepelev S.F. The Development of Multi-Criterial Approaches to Assess the Competitiveness of Power Plants with Nuclear and Non-Nuclear Energy Sources 67

Kachur S.A. Optimization of partition of load in the net of power supply with nondeterministic and losses of power 83

Smirnov V.V., Kavun A.I., Maximenko T.S., Starchenko M.A. Analysis of the use of compensating device type CHDB 202 in new network configurations 88

Smirnov V.V., Kavun A.I. Comparative analysis of fiber-optic current and voltage converters with electromagnetic measuring transformers 92

Smirnov V.V., Laurenchuk A.A., Maximenko T.S., Starchenko M.A., Chernova E.Yu. Comparative analysis of the use of composite core wires with wires of traditional construction 96

Smirnov V.V., Chernova K.Yu., Starchenko M.A. ,Maximenko T.S. Approaches to modeling power system loads 103

Chemical technology of nuclear power plants 110

Frolova M.A., Ponomarenko P.A., Tananaev I.G., Chicherina Y.S. The isotope composition of hydrogen and its transformation in the fields of thermal neutrons in the active zones of the VVER-type reactors 110

Cherkashina N.I. competitive sorption when cleaning liquid technological media from ions of copper, lead and iron 115

Cherkashina N.I., V.A. Erofeev N.I. The recovery of uranium from process media by a sorbent on the basis of lignin 121

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Дистанционное управление мощностью разрушенных реакторов на основе кривизны пространства

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

Статья поступила 22.11.2018 г.; после доработки 26.11.2018 г.

Аннотация
Предложен метод для высвобождения энергии реакции на мгновенных нейтронах, протекающей в разрушенных реакторах, за счет искривления пространства вокруг разрушенного реактора. Создание пространственно-временных монополей позволит перевести реактор в состояние останова

Ключевые слова: ядерный реактор, аварийный блок, Чернобыль, пространственно-временной монополь, управление мощностью.

Remote Control of the Power of Destroyed Reactors on the basis of Space Curvature

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

Received 22.11.2018 y.; received in final form 26.11.2018 y.

Abstract
A method is proposed for the release of the reaction energy on instantaneous neutrons flowing in destroyed reactors due to the curvature of the space around the destroyed reactor. The creation of space-time monopolies will allow the reactor to be brought to a standstill.

Keywords: nuclear reactor, safety block, Chernobyl, space-time monopole, power control.

Введение

С момента катастрофы на Чернобыльской АЭС более 30 лет, и до сих пор разрушенная станция представляет собой опасность. Над аварийным блоком АЭС был построен «саркофаг», но он давно отслужил свой срок и в последние годы разрушается. Над блоком возводят новую защитную конструкцию, но ее эффективность многие специалисты подвергают сомнению. Исследования [1] показали, что облученное ядерное топливо внутри «Укрытия» находится в виде следующих модификаций.

Фрагменты активной зоны (АЗФ), большая часть которых, как предполагают, выброшена при взрыве на верхние этажи блока, в частности, в центральный зал, часть находится в шахте реактора и помещении 305/2.

Застывшие лавообразные топливосодержащие массы (ЛТСМ). Они образовались во время активной стадии аварии (26.04.86 – 06.05.86) при высокотемпературном взаимодействии топлива с конструкционными материалами блока и распространились по подреактор-

ным помещениям. Ниже мы более подробно остановимся на этой модификации.

Мелкодиспергированное топливо (пыль) – горячие топливные частицы (ТП). Размеры частиц изменяются от долей микрона до сотен микрон. Они наблюдаются практически во всех помещениях объекта и в образцах почвы в ближней и дальней зоне.

В 1990 г. было обнаружено, что в воде, находящейся в ряде нижних помещений объекта, содержатся растворенные формы урана, плутония, америция. Причина появления растворимых соединений – разрушение различных модификаций топлива под действием ряда факторов, основной из которых – вода, проникающая в «Укрытие».

В темное время суток из проемов разрушенного «укрытия» виден яркий свет, что свидетельствует об идущих ядерных реакциях и высоком уровне температуры. В настоящее время нет точного ответа, каков состав топлива и что происходит в разрушенной активной зоне. В конце 90-х годов было обнаружено и подтверждено разрушение топливных масс, превращение их в пыль, тогда же были обнаружены растворимые соединения урана. Украина перестала финансировать исследования по топливосодержащим массам, поэтому в настоящее время сведения о физико-химическом состоянии топливосодержащих масс – это конец прошлого века и, начало этого века. Происходит деградация топливной матрицы. С какой скоростью идет растворение обнаруженных в конце прошлого века соединений делящихся уранов, где накапливается, никто сейчас достоверно, ссылаясь на исследования, не знает.

Опасность разрушенных реакторов не вызывает сомнения. Технологий, позволяющих управлять процессами внутри «саркофагов» не существует. В этой связи предлагается новый подход к управлению мощностью разрушенных реакторов на основе кривизны пространства [2-4] в случае начала неуправляемой цепной реакции, возможность которой в настоящее время отрицается. Однако никто не знает, как будут развиваться события в будущем.

Предлагается осуществлять высвобождение энергии реакции на мгновенных нейтронах за счет искривления пространства вокруг разрушенного реактора. Создание пространственно-временных монополей [2-4] позволит перевести реактор в состояние останова. Также предлагается добиться подобного результата за счет неудачного формирования монополя при использовании объекта-отражателя в качестве «громоотвода» с последующим разрушением этого объекта.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является создание подхода дистанционного управления мощностью разрушенных реакторов посредством создания в момент неуправляемой цепной реакции пространственно-временного монополя.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) разработать метод определения влияния состава ядерного топлива на кривизну создаваемого монополя;
2) определить граничные пропорции элементов ядерного топлива, позволяющие создать пространственно-временной монополь реактора;
3) разработать схемы управления мощностью реактора на основе пространственно-временных монополей.

Влияние состава ядерного топлива на порядок кривизны пространственно-временного монополя реактора

Предложенную в [2] формулу коэффициента кривизны монополя ядерного реактора как для случая голой сингулярности, так и скрытой сингулярности, соответствующую минимальному содержанию продуктов воспроизводства , необходимо дополнить коэффициентом, учитывающим соотношение урана ^{235}U и плутония ^{239}Pu в ядерном топливе.

В соответствии с [5] определим частоту реактивности для плутония ω_{pu}, урана ω_u и частоту ω топлива из урана и плутония соответственно формулами (1), (2) и (3)

$$\omega_{pu} = \beta_{Pu}/l, \quad (1)$$

$$\omega_u = \beta_U/l, \quad (2)$$

$$\omega = (\beta_{Pu}k_{Pu} + \beta_U k_U)/l, \quad (3)$$

где β_{Pu} – доля соответственно всех запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейронов для ^{239}Pu; β_U – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейронов для ^{235}U; l – время жизни мгновенных нейтронов; k_{Pu}, k_U – доля плутония ^{239}Pu и доля урана ^{235}U в ядерном топливе соответственно.

Учитывая, что для равновесного состояния, когда ядерный реактор может выступать в качестве ядра как голой, так и скрытой сингулярно-

сти, основным показателей возможности создания пространственно-временного монополя являются величина доли запаздывающих нейтронов плутония по отношению к полному числу нейронов и количество урана, для преобразования формулы (3) будем использовать следующее соотношение

$$\beta_{Pu}k_{Pu}\beta_U k_U = \beta_{Pu}^2 k_U^2 . \quad (4)$$

Определим взаимосвязь количества плута и урана в топливе следующим образом

$$k_U = 1 - k_{Pu}, \quad k_{Pu} = 1 - k_U . \quad (5)$$

С учетом (5) приведем (3) к виду

$$\omega = (\beta_{Pu} - \beta_{Pu}k_U + \beta_U - \beta_U k_{Pu})/l . \quad (6)$$

или, учитывая (1) и (2),

$$\omega_{pu} + \omega_u - \omega = (\beta_{Pu}k_U + \beta_U k_{Pu})/l . \quad (7)$$

Правая часть соотношения соответствует частоте ω_M взаимодействия различных элементов топлива и определяет возможность создания монополя реактора

$$\omega_M = (\beta_{Pu}k_U + \beta_U k_{Pu})/l . \quad (8)$$

Граничные значения частот, определенных формулами (1), (2) и (8), соответствуют частоте взрыва $\omega_р$=0,33 Гц, частоте первой гармоники ω_1=1,1 Гц и частоте нулевой гармоники ω_0=0,48 Гц.

Зная граничные значения частот изменения реактивности, запишем тождество частот топлива

$$\omega_{pu} + \omega_u = 3\omega_M$$

или в терминах β

$$\beta_{pu} + \beta_u = 3\beta_M .$$

Исходя из выше сказанного, определим соотношения для расчета пропорций элементов топлива, необходимых для создания двух типов монополей: скрытой сингулярности и голой сингулярности.

Для монополя типа «скрытая сингулярность» в соответствии с (1) и (8) будем иметь выражение

$$\frac{\omega'_M}{\omega_p} = \frac{\beta_{Pu}k'_U + \beta_U k'_{Pu}}{\beta_{Pu}},$$

$$k'_U = 1 - k'_{Pu},$$

$$k'_{Pu} = \frac{1 - \omega'_M/\omega_p}{1 - \beta_U/\beta_{Pu}}, \quad (9)$$

где ω'_M – частота, на которой создается монополь «черная дыра» при соответствующем составе топлива.

Минимальное содержание плутония соответствует ω'_M=0,48 Гц и составляет 21%. Величина частоты создания черной дыры ядерного реактора возрастает при увеличении содержания плутония в топливе.

Для монополя типа «голая сингулярность» в соответствии с (1) и (8) будем иметь выражение

$$\frac{\omega_0}{\omega''_M} = \frac{\beta_{Pu}k''_U + \beta_U k''_{Pu}}{\beta_U},$$

$$k''_{Pu} = 1 - k''_U,$$

$$k''_U = \frac{1 - \omega_0/\omega''_M}{1 - \beta_{Pu}/\beta_U}, \quad (10)$$

где ω''_M – частота, на которой создается монополь «голая сингулярность» при соответствующем составе топлива.

Минимальное содержание плутония соответствует ω''_M=1,1 Гц и составляет 18%. Величина частоты создания голой сингулярности ядерного реактора уменьшается при увеличении содержания плутония в топливе.

Количество плутония определяет порядок кривизны монополя реактора, т.е. влияет на величину n в формулах (11) и (12) для расчета коэффициента кривизны пространства в случаях скрытой и голой сингулярности соответственно.

$$k_p = 2\pi n, \quad n=1, 2, \ldots, \quad (11)$$

$$k_p = 2en, \quad n=1, 2, \ldots . \quad (12)$$

С учетом выше изложенного необходимо скорректировать формулу для определения коэффициента искривления пространства, приведенную в [4]

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{k_1(1 + 10F\beta'\omega')}\right)^2}}, \quad (13)$$

где $k_1 \approx \frac{T_{HK} + \Delta T_{HK}}{T_{HK}}$, $\left(\frac{\Delta T_{HK}}{T_{HK}}\right)_{\max} = \frac{\alpha}{4}$,

$$F = \frac{1}{\omega_{MP}} \cdot \frac{\beta_6}{\beta}\omega_2, \quad \omega_2 = k_{np} \cdot \frac{c}{\ln(c^2)},$$

ω' – частота нулевой или первой гармоники в зависимости от типа сингулярности; ω_{MP} – частота ядерного магнитного резонанса; β и β_6 – доля соответственно всех запаздывающих нейтронов и нейтронов 6-й группы по отношению к полному числу нейронов для ^{235}U; β′ – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейронов для ^{239}Pu или ^{235}U в зависимости от типа сингулярности; F – частотный коэффициент ядерного магнитного резонанса; k_1 – температурный коэффициент усиления, задающий исходное состояние реактора в момент внешнего электромагнитного воздействия; T_{HK}, ΔT_{HK} – температура начала поверхностного кипения теплоносителя и ее измене-

ние; α – постоянная тонкой структуры; k_{np} – константа, необходимая для согласования размерности.

В формулу (13) введем коэффициент изменения количества плутония

$$k_R = k_{Pu_\min} / k_{Pu}, \quad (14)$$

где $k_{Pu_\min}$, k_{Pu} – минимальная возможная доля плутония в топливе для создания черной дыры или голой сингулярности в соответствии с рассматриваемым типом монополя и текущая доля плутония в составе топлива.

С учетом (14) формула (13) примет вид

$$k = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{1}{k_1(1+10k_R F\beta'\omega')}\right)^2}}.$$

Частотный диапазон создания монополей любого типа ограничивается частотами нулевой и первой гармоник реактивности.

При доле плутония в ядерном топливе 24,4% (расчет выполнен в соответствии с тождеством (4)) возможен процесс перетекания энергии с одного реактора на другой с меньшим содержанием плутония в топливе. Частота процесса перетекания энергии рассчитывается по формуле (3) при k_{Pu}=0,244, k_U=0,756, l=10^{-4}с и составляет 54Гц.

Создание пространственно-временных монополей разрушенных реакторов с целью нейтрализации продуктов воспроизводства

Для разрушенных реакторов, в которых ядерные реакции, безусловно, имеют место, с течением времени происходит накапливания продуктов воспроизводства, в частности плутония, что при достижении его содержания предельной концентрации (19% -21%) может привести к неуправляемой ядерной реакции.

Преобразование энергии ядерного топлива разрушенных реакторов при неуправляемом росте реактивности возможно при создании пространственно-временного монополя любого из двух типов. В результате появления монополя разрушенный ректор переходит в состояние останова.

Выбор типа монополя определяется способом технической реализации системы дистанционного управления мощностью разрушенного реактора.

В работах [2-4] приведены величины частоты элементов (реактора, радиоизлучателя и объекта-отражателя), задействованных при создании монополей реактора.

Перечислим данные частоты: ω_0=0,48 Гц – частота нулевой гармоники реактивности, ω_1=1,1 Гц – частота первой гармоники реактивности, $\omega_{ЯМР}$=$3\cdot10^5$ Гц – частота ядерного магнитного резонанса, $\omega_{АР}$=$7\cdot10^{-3}$ Гц – частота антирезонанса, $\omega_{РМ}$=$4{,}2\cdot10^{12}$ Гц – частота фотонного излучения (резонанса).

Ядерный реактор (Р) должен работать на частоте ω_0 при создании монополя типа «скрытая сингулярность» и ω_1 при создании «голой сингулярности»; радиоизлучатель (И) функционирует на частоте $\omega_{ЯМР}$; объект-отражатель (О) должен иметь частоты ω_0 или ω_1 в соответствии с типом монополя, $\omega_{АР}$, $\omega_{РМ}$, $\omega_{ЯМР}$.

Необходимо, чтобы объект-отражатель находился в точке входа в создаваемый монополь.

Схемы расположения элементов, создающих монополь, и точек входа и выхода для различных типов монополей приведены на рис. 1. Зона расширения (1), зона задержки (2) и зона сжатия (3) монополей имеют разную последовательность для различных типов монополей. Точка входа «скрытой сингулярности» лежит на внешней границы зоны расширения монополя, а точка выхода «голой сингулярности» лежит на внешней границы зоны сжатия монополя.

Расстояние от реактора или центра системы реакторов до точки входа «голой сингулярности» или точки выхода «скрытой сингулярности» определяется формулой

$$R_{00} = \begin{cases} \frac{c}{2\omega_{ЯМР}} \text{ для "скрытой сингулярности",} \\ \frac{c}{\omega_{ЯМР}} \text{ для "голой сингулярности} \end{cases},$$

где $\omega_{ЯМР}$=$3\cdot10^5$ Гц – частота ядерного магнитного резонанса; c – скорость света.

Более простая с точки зрения технической реализации схема перевода разрушенного реактора в заглушенное состояние не предполагает создания монополя любого типа.

Она рассматривает объект-отражатель как некий «громоотвод», через который энергия с реактора перетекает на Землю.

В этом случае объект-отражатель может потерять работоспособность или быть разрушен.

Объект-отражатель должен находиться в точке входа возможного монополя типа «голая сингулярность» и иметь частоты ω_1, $\omega_{ЯМР}$, ω_2=0,0375 Гц – частоту естественного реактора Земли.

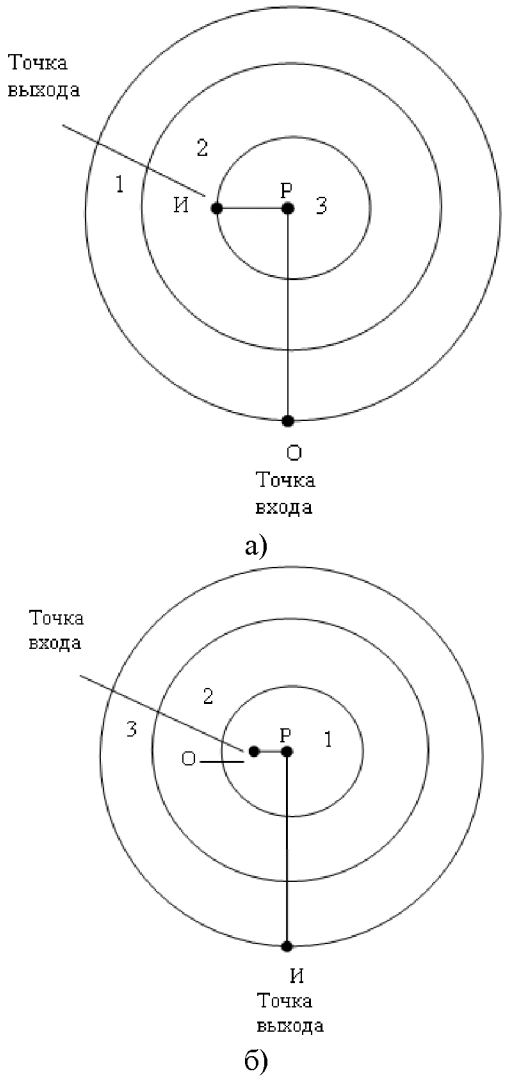

Рис.1. Схемы монополей типа «скрытая сингулярность» (а) и «голая сингулярность (б).

Заключение

Показано, исключить накопление уранплутониевых масс в разрушенных реакторах невозможно. Поэтому предлагается новый метод для высвобождения энергии реакции на мгновенных нейтронах, протекающей в разрушенных реакторах, за счет искривления пространства вокруг разрушенного реактора. Создание пространственно-временных монополей позволит перевести реактор в состояние останова.

Разработан метод определения влияния состава ядерного топлива на кривизну создаваемого монополя. Определены граничные пропорции элементов ядерного топлива, позволяющие создать пространственно-временной монополь реактора. Даны схемы управления мощностью реактора на основе пространственно-временных монополей.

Исследование способствуют становлению теории пространственно-временных монополей реакторов и направлено на обеспечение безопасности разрушенных ядерных реакторов.

Список литературы

1. Арутюнян Р.В. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС / Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, А.А. Боровой, Е.П. Велихов, А.А. Ключников. – М.: Наука, 2010. – 240 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами/ И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; Под общ. ред. акад. Н.А. Доллежаля – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.

References

1. Arutyunyan R.V., Bol'shov L.A., Borovoj A.A., Velihov E.P., Kluychnikov A.A. *Yadernoe toplivo v ob"ekte «Ukrytie» Chernobyl'skoj AES* [Nuclear fuel in the "Shelter" of the Chernobyl nuclear power plant]. Moscow, Nauka, 2010, 240 p.
2. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. E*nergeticheskie ustanovki i tekhnologii.* 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
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. 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.
5. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Naucho-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical government bases by nuclear reactors]. Moskow, Energoizdat, 1981. 360p.

УДК 539.3:536.46

Расчет на прочность рабочих лопаток центробежных насосов большой кривизны

В.А.Пухлий[1], В.В.Соколов[1], Н.К.Корнеева[1], Л.Н.Пичугова[1], К.В.Пухлий[2]
[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7 г.Севастополь, 299015, Россия, e-mail: pu1611@rambler.ru*
[2]*АО «Аэротекс», 127349, Москва, ул.Мурановская, 17-147*

Статья поступила 12.11.2018 г.; посла доработки 14.11.2018 г.

Аннотация

Рассматривается расчет на прочность рабочих лопаток центробежных насосов большой кривизны. Исходная задача описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных 8-го порядка. Решение задачи основано на применении метода интегральных соотношений Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений разработанного профессором В.А.Пухлий. Приводятся результаты расчетов.

Ключевые слова: центробежные насосы, рабочие лопатки большой кривизны, расчет на прочность, модифицированный метод последовательных приближений.

Calculation on durability of working blades of centrifugal pumps of the big curvature

V.A.Pukhliy[1], V.V.Sokolov[1], N.K.Korneeva[1], L.N.Pichugova[1], K.V.Pukhliy[2]
[1]*Sevastopol state University, 299015, Russia, Sevastopol, Kurchatova Street, 7*
[2]*Aeroteks Enterprise, 127349, Moscow, street Muranovsky, 17-147*

Received 12.11.2018 y.; received in final from 14.11.2018 y.

Abstract

Calculation on durability of working blades of centrifugal pumps of the big curvature is considered. The initial problem is described by system of the differential equations in private derivatives of 8th order. The problem decision is based on application of a method of integrated parities Dorodnizin`s and the modified method consecutive approaches V.A.Pukhliy developed by the professor. Results of calculations are resulted.

Keywords: centrifugal pumps, working blades of the big curvature, calculation on durability, modified method consecutive approaches.

Введение

Большой класс центробежных насосов имеют рабочие лопатки с большим радиусом кривизны. В этом случае теория пологих оболочек [1] неприменима и целесообразно к расчету таких лопаток применять теорию непологих оболочек.

В настоящей работе излагается метод расчета напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток центробежных насосов на основе теории непологих цилиндрических оболочек [2].

В качестве основных уравнений для описания напряженно-деформированного состояния приняты уравнения В.З.Власова [3], которые по сравнению с известными уравнениями других авторов обладают свойством симметрии уравнений оболочки, т.е. дифференциальные операторы, расположенные относительно главных диагональных членов симметрично, имеют одинаковые выражения. Важно, что это свой-

ство симметрии уравнений находится в полном согласии с основными теоремами теории упругости и, в частности, с теоремой Бетти о взаимности работ. Это свойство уравнений В.З.Власова особо важно в задачах о собственных колебаниях, поскольку эти задачи при симметричной матрице основных дифференциальных уравнений всегда приводится к вековому уравнению, дающему для спектра всех частот колебаний действительные значения. Уравнения А.Лява [4, 5] Б.Г.Галеркина [6] и др. вследствие асимметрии основной матрицы могут для высших частот колебаний давать мнимые значения, что расходится с законом сохранения энергии.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью научной работы является разработка аналитического подхода к интегрированию систем дифференциальных уравнений в частных производных высокого порядка и применение данного подхода к решению задачи о напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток центробежных насосов большой кривизны.

Формулировка краевой задачи

На рис.1 приведена геометрия и система координат для цилиндрической круговой лопатки. Здесь u, v, w – перемещения в направлении осей x, y, z соответственно; $k_1 = 1/R = const; k_2 = 0$; A = B = R = const.

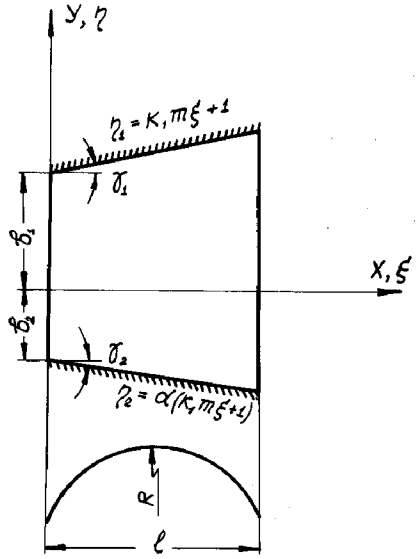

Рис.1. Геометрия и система координат для круговой лопатки радиального нагнетателя.

Вводя безразмерные координаты $\xi = s/l$ и $\eta = y/b_1$, запишем исходные уравнения В.З.Власова в следующем виде:

$$\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial\xi^2}+\frac{1-\nu}{2}m^2\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial\eta^2}+\frac{1+\nu}{2}m\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial\xi\partial\eta}+$$
$$+\frac{l}{R}\frac{\partial\bar{w}}{\partial\xi}-\frac{3-\nu}{24}\frac{m^2h^2}{Rl}\frac{\partial^3\bar{w}}{\partial\xi\partial\eta^2}=-\frac{(1-\nu^2)l^2p}{Eh^2};$$
$$\frac{1+\nu}{2}m\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial\xi\partial\eta}+m^2\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial\eta^2}+\frac{1-\nu}{2}\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial\xi^2}+\nu m\frac{l}{R}\frac{\partial\bar{w}}{\partial\eta}-$$
$$-\frac{h^2}{12Rl}\left(m^3\frac{\partial^3\bar{w}}{\partial\eta^3}-\frac{1-\nu}{2}m\frac{\partial^3\bar{w}}{\partial\xi^2\partial\eta}\right)=0;$$
$$12\frac{l^3}{Rh^2}\frac{\partial\bar{u}}{\partial\xi}-\frac{(3-\nu)lm^2}{R}\frac{\partial^3\bar{u}}{\partial\xi\partial\eta^2}+12\frac{\nu ml^3}{Rh^2}\frac{\partial\bar{v}}{\partial\eta}-$$
$$-\frac{ml}{R}\left(m^2\frac{\partial^3\bar{v}}{\partial\eta^3}-\frac{(1-\nu)}{2}\frac{\partial^3\bar{v}}{\partial\eta\partial\xi^2}\right)+$$
$$+\nabla_m^4\bar{w}+2\frac{l^2}{R^2}\frac{\partial^2\bar{w}}{\partial\xi^2}+\frac{l^4}{R^2}\left(\frac{1}{R^2}+12\frac{1}{h^2}\right)\bar{w}=$$
$$=12\frac{(1-\nu^2)q_zl^4}{Eh^4}. \qquad (1)$$

Здесь $\bar{u}=\frac{u}{h}$; $\bar{v}=\frac{v}{h}$; $\bar{w}=\frac{w}{h}$ – безразмерные функции перемещений; $m = l/b_1$ – геометрический параметр лопатки, остальные обозначения прежние.

Запишем выражения для нормальной – q_z и тангенциальной – p компонент центробежной нагрузки (рис.2).

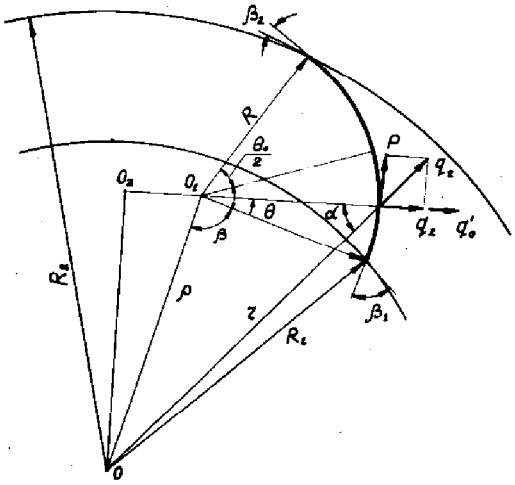

Рис.2. Нагрузки, действующие на лопатку.

Из рис.2 имеем:

$$q_z = q_0 + q_1\sin\theta + q_2\cos\theta;$$

$$p = q_1 \cos\theta - q_2 \sin\theta, \quad (2)$$

где

$$q_0 = \frac{\gamma}{g}\omega^2 hR + q_0'; \quad (3)$$

$$q_1 = \frac{\gamma}{g}\omega^2 h\rho \sin\beta; \quad (4)$$

$$q_2 = -\frac{\gamma}{g}\omega^2 h\rho \cos\beta. \quad (5)$$

В выражении (3) q_0' – аэродинамическое давление потока. На рис.2 обозначено: r – текущий радиус, равный расстоянию между образующей лопатки и осью вращения колеса; R – радиус кривизны лопатки; ρ – расстояние между осью лопатки и осью вращения колеса; α – угол между плоскостью, проходящей через образующую лопатки и ось вращения колеса; β – угол между плоскостью, проходящей через ось лопатки и внутренний ее прямолинейный край и плоскость, проходящей через ось цилиндрической лопатки и ось вращения колеса.

Граничные условия для лопатки рассматриваются следующие. Лопатка по краям, прилегающим к дискам $\eta_1 = k_1 m\xi + 1$ и $\eta_2 = \alpha\eta_1$, защемлена. Граничные условия примут вид:

$$\overline{w} = \frac{\partial \overline{w}}{\partial \eta} = \overline{u} = \overline{v} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия на входной кромке $\xi = \frac{\theta_0 R}{l}$ и выходной $\xi = 0$ соответствуют свободному краю:

$$N_{11} = N_{12} = M_{11} = Q_1^0 = 0, \quad (7)$$

или в безразмерных функциях перемещений:

$$\frac{l}{R}\frac{\partial \overline{u}}{\partial \xi} + \frac{l^2}{R^2}\overline{w} + \nu m \frac{l}{R}\frac{\partial \overline{v}}{\partial \eta} + \frac{h^2}{12R^2}\left(\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \xi^2} + \frac{l^2}{R^2}\overline{w}\right) = 0$$

$$\frac{l}{R} m \frac{\partial \overline{u}}{\partial \eta} + \frac{l}{R}\frac{\partial \overline{v}}{\partial \xi} + \frac{h^2}{12R^2} m \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \xi \partial \eta} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \xi^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \eta^2} + \frac{l^2}{R^2}\overline{w} = 0;$$

$$(1-\nu) m^2 \frac{l}{R}\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial \eta^2} - \frac{l^2}{R^2}\frac{\partial \overline{w}}{\partial \xi} - \frac{\partial^3 \overline{w}}{\partial \xi^3} - m^2 \frac{\partial^3 \overline{w}}{\partial \xi \partial \eta^2} = 0 \quad (8)$$

Решение краевой задачи

К решению краевой задачи, описываемой уравнениями (1) и граничными условиями (6) и (8) применим метод интегральных соотношений Дородницына [7]. В соответствии с методом представим систему (1) в дивергентной форме:

$$\frac{\partial \overline{X}}{\partial \xi} + \frac{\partial \overline{Y}}{\partial \eta} + \overline{L} = 0; \quad (9)$$

$$\overline{X} = \{X_i\} = \{\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}, \overline{z}_1, \overline{z}_2, \overline{z}_3, \overline{z}_4, \overline{z}_5\};$$

$$\overline{Y} = B_0 \overline{X} + B_1 \frac{\partial \overline{X}}{\partial \eta} + B_2 \frac{\partial^2 \overline{X}}{\partial \eta^2} + B_3 \frac{\partial^3 \overline{X}}{\partial \eta^3};$$

$$\overline{L} = B\overline{X} + \overline{b}.$$

При этом элементы матриц $B_r = \{b_{mn}^r\}$ и $B = \{b_{mn}\}$ (r = 0, 1, 2, 3; m, n = 1, 2, …, 8) принимают следующие значения:

$$b_{14}^1 = \frac{1-\nu}{2}m^2; \; b_{25}^1 = \frac{2m^2}{1-\nu};$$

$$b_{28}^2 = -2\frac{m^3 l}{R}; \; b_{28}^0 = 12\frac{\nu m l^3}{Rh^2};$$

$$b_{35}^0 = \frac{2\nu m l}{(1\text{-}нн)}; \; b_{35}^2 = -\frac{m^3 h^2}{6(1-\nu)lR};$$

$$b_{38}^3 = m^4\left(1 + \frac{h^2}{12R^2}\right); b_{38}^1 = -\frac{\nu m^2 l^2}{R^2};$$

$$b_{38} = \frac{l^4}{R^2}\left(\frac{1}{R^2} + \frac{12}{h^2}\right);$$

$$b_{41} = -1;$$

$$b_{45}^0 = \frac{1+\nu}{1-\nu}m;$$

$$b_{48} = 12\frac{l^3}{Rh^2};$$

$$b_{48} = -\frac{m^2 l}{R}\left[\frac{1-\nu}{2} + (3-\nu)\right]; b_{52} = -1;$$

$$b_{54}^0 = \frac{1+\nu}{2}m;$$

$$b_{63} = -1;$$

$$b_{64} = \frac{l}{R};$$

$$b_{64}^1 = -\frac{3-\nu}{24}m^2\frac{h^2}{Rl};$$

$$b_{75}^0 = \frac{mh^2}{12Rl};$$

$$b_{76} = -1;$$

$$b_{78}^1 = m^2\left[2 - \frac{(1-\nu)h^2}{24R^2}\right];$$

$$b_{78} = 2\frac{l^2}{R^2};$$

$$b_{87} = -1.$$

Остальные элементы равны нулю. Компоненты вектора $\bar{b}$ равны:

$$b_4 = \frac{(1-\nu^2)l^2 p}{Eh^2}; b_8 = -12\frac{(1-\nu^2)ql^4}{Eh^4};$$

$$b_1 = b_2 = b_3 = b_5 = b_6 = b_7 = 0.$$

Следуя методу интегральных соотношений ищем решение системы уравнений (9) в виде разложения:

$$X_i(\xi,\eta) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi)P_j(\xi,\eta) & (i = 3,6,7,8) \\ \sum_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi)P_{j,2}(\xi,\eta) & (i = 1,2) \\ \sum_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi)P_{j,22}(\xi,\eta) & (i = 4,5) \end{cases} \quad (10)$$

Выбираем в качестве аппроксимирующих и весовых функций системы ортогональных полиномов Якоби [8, 9] и их производные:

$$P_j(\zeta,\eta) = P_1(\zeta,\mu)\sum_{j=1}^{n}\left[\eta - \frac{(1+\alpha)r}{2}\right]^{j-1};$$

$$P_1(\zeta,\eta) = \eta^4 - 2(1+\alpha)r\eta^3 + \left(1+4\alpha+\alpha^2\right)r^2\eta^2 - 2\alpha(1+\alpha)r^3\eta + \alpha^2 r^4. \quad (11)$$

Здесь $r = 1 + k_1 m\zeta$ - уравнение наклонной стороны лопатки.

Отметим, что полиномы $P_j(\zeta,\eta)$ ортогональны на отрезке $[\eta_1, \eta_2]$ и, образуя систему линейно независимых функций, удовлетворяют граничным условиям на косых краях лопатки (6).

После применения процедуры метода интегральных соотношений к исходной системе уравнений (9), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений порядка 8n с переменными коэффициентами неэйлеровского типа:

$$X_{1,1} = -\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_1 + \frac{km(1+\alpha)}{4}X_2 + X_7;$$

$$X_{2,1} = -11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_1 - \frac{11}{2}\frac{km}{r}X_2 + X_8;$$

$$X_{3,1} = -\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_3 + \frac{km(1+\alpha)}{4}X_4 + X_9;$$

$$X_{4,1} = -11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_3 - \frac{11}{2}\frac{km}{r}X_4 + X_{10};$$

$$X_{5,1} = -\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_5 + \frac{km(1+\alpha)}{4}X_6 + X_{11};$$

$$X_{6,1} = -11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_5 - \frac{11}{2}\frac{km}{r}X_6 + X_{12};$$

$$X_{7,1} = 6\frac{(1-\nu)m^2}{r^2(1-\alpha)^2}X_1 - \frac{9}{2}\frac{km}{r}X_7 + \frac{km(1+\alpha)}{4}X_8 - \frac{(1+\nu)}{4}X_{10} - \left[\frac{l}{R} + \frac{(3-\nu)m^2h^2}{2Rlr^2(1-\alpha)^2}\right]X_{11} - \frac{21}{r^4(1-\alpha)^4}\frac{(1-\nu^2)l^2 p}{Eh^2};$$

$$X_{8,1} = 22\frac{(1-\nu)m^2}{r^2(1-\alpha)^2}X_2 - 11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_7 - \frac{11}{2}\frac{km}{r}X_8 - 11\frac{(1+\nu)m}{r^2(1-\alpha)^2}X_9 - \left[\frac{l}{R} + \frac{11}{6}\frac{(3-\nu)m^2h^2}{r^2(1-\alpha)^2Rl}\right]X_{12};$$

$$X_{9,1} = 24\frac{m^2}{(1-\nu)r^2(1-\alpha)^2}X_3 - \left[\frac{\nu ml}{(1-\nu)R} + 3\frac{m^3h^2}{Rl(1-\nu)r^2(1-\alpha)^2}\right]X_6 - \frac{(1+\nu)m}{2(1-\nu)}X_8 - \frac{9}{2}\frac{km}{r}X_9 + \frac{km(1+\alpha)}{4}X_{10} - \frac{1}{24}\frac{mh^2}{Rl}X_{14};$$

$$X_{10,1} = 88\frac{m^2}{(1-\nu)r^2(1-\alpha)^2}X_4 + 44\frac{m}{(1-\nu)R(1-\alpha)^2r^2}\left[\nu l + \frac{m^2h^2}{lr^2(1-\alpha)^2}\right]X_5 + 22\frac{(1+\nu)m}{(1-\nu)r^2(1-\alpha)^2}X_7 - 11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_9 - \frac{11}{2}\frac{km}{r}X_{10} + \frac{11}{6}\frac{mh^2}{Rl}\frac{1}{r^2(1-\alpha)^2}X_{13};$$

$$X_{11,1} = -\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_{11} + \frac{km(1+\alpha)}{4}X_{12} + X_{13};$$

$$X_{12,1} = -11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1+\alpha)^2}X_{11} - \frac{11}{2}\frac{km}{r}X_{12} + X_{14};$$

$$X_{13,1} = -\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_{13} + \frac{km(1+\alpha)}{4}X_{14} + X_{15};$$

$$X_{14,1} = -11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_{13} - \frac{11}{2}\frac{km}{r}X_{14} + X_{16};$$

$$X_{15,1}=-6\frac{ml}{R}\left[\frac{\nu l^2}{h^2}+6\frac{m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\right]X_4-$$
$$-\left[\frac{504m^4}{r^4(1-\alpha)^4}+12\frac{l^4}{h^2R^2}+42\frac{m^4h^2}{R^2(1-\alpha)^2r^2}+\right.$$
$$\left.+12\frac{\nu m^2l^2}{R^2(1-\alpha)^2r^2}+\frac{l^4}{R^4}\right]X_5-$$
$$-6\frac{l}{R}\left[2\frac{l^2}{h^2}+\frac{(1-\nu)m^2l}{(1-\alpha)^2r^2}+2\frac{(3-\nu)m^2}{(1-\alpha)^2r^2}\right]X_7+$$
$$+\left[24\frac{m^2}{r^2(1-\alpha)^2}-\frac{1}{2}\frac{m^2h^2(1-\nu)}{R^2(1-\alpha)^2r^2}-2\frac{l^2}{R^2}\right]X_{13}-$$
$$-\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_{15}+\frac{km(1+\alpha)}{4}X_{15}+$$
$$+\frac{km(1+\alpha)}{4}X_{16}+252\frac{(1-\nu^2)ql^4}{Eh^4(1-\alpha)^4r^4};$$
$$X_{16,1}=264\frac{ml}{R}\frac{1}{r^2(1-\alpha)^2}\left[\frac{\nu l^2}{h^2}+6\frac{m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\right]X_3-$$
$$-\left[3960\frac{m^4}{r^4(1-\alpha)^4}+12\frac{l^4}{h^2R^2}+\right. \quad (11)$$
$$\left.+330\frac{m^4h^2}{R^2}\frac{1}{r^4(1-\alpha)^4}+44\frac{\nu m^2l^2}{R^2(1-\alpha)^2r^2}+\frac{l^4}{R^4}\right]X_6-$$
$$-\left[12\frac{l^3}{Rh^2}+22\frac{(1-\nu)m^2l}{r^2(1-\alpha)^2R}+44\frac{(3-\nu)lm^2}{r^2(1-\alpha)^2R}\right]X_8+$$
$$+\frac{m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\left[88-\frac{11}{6}\frac{(1-\nu)h^2}{R^2}\right]X_{14}-$$
$$-11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_{15}-\frac{11}{2}\frac{km}{r}X_{16}. \quad (12)$$

В уравнениях (12) нижний индекс i, следующий после запятой, означает частное дифференцирование по координате ξ.

В соответствии с методом интегральных соотношений запишем граничные условия по входной и выходной кромкам:

$$\frac{\nu ml}{2R}X_4+\frac{l^2}{R^2}\left(1+\frac{h^2}{12R^2}\right)X_5+\frac{l}{R}X_7+$$
$$+\frac{h^2}{12R^2}X_{13}=0;$$
$$\frac{ml}{2R}X_2+\frac{l}{R}X_9+\frac{mh^2}{24R^2}X_{12}=0;$$
$$\left[\frac{l^2}{R^2}-12\frac{\nu m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\right]X_5+X_{13}=0;$$
$$12\frac{(1-\nu)m^2l}{r^2(1-\alpha)^2R}X_1-\left[\frac{l^2}{R^2}-12\frac{m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\right]X_{11}+$$
$$+X_{15}=0;$$
$$22\frac{\nu m}{r^2(1-\alpha)^2}X_3-\frac{l}{R}\left[1+\frac{h^2}{12R^2}\right]X_6-X_8-$$
$$-\frac{h^2}{12Rl}X_{14}=0;$$
$$22\frac{ml}{r^2(1-\alpha)^2R}X_1-\frac{l}{R}X_{10}+\frac{11}{6}\frac{mh^2}{r^2(1-\alpha)^2R^2}X_{11}=0$$
$$\left[\frac{l^2}{R^2}-44\frac{\nu m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\right]X_6+X_{14}=0;$$
$$44\frac{(1-\nu)m^2l}{r^2(1-\alpha)^2R}X_2+$$
$$+\left[\frac{l^2}{R^2}+44\frac{m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\right]X_{12}+X_{16}=0. \quad (13)$$

В дальнейшем к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (12) применяется модифицированный метод последовательных приближений, разработанный проф. В.А.Пухлий и опубликованный им в академической печати [10, 11]. Вопросы сходимости решения изложены в работе проф. В.А.Пухлия [12].

Модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева

В настоящее время широкое распространение получили численные методы [13].

Однако, как справедливо отметил академик Л.В.Канторович [14], было бы преждевременным на основании доверия к «выводам» машинной техники приближенные аналитические методы считать окончательно устаревшими. Применяя различного рода модификации, некоторые из этих методов могут быть существенным образом улучшены. Классическим примером такого рода модификации являются разработанные А.Н.Крыловым методы ускорения сходимости тригонометрических рядов.

Проф. В.А.Пухлий для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами высокого и первого порядка применял модифицированный метод последовательных приближений [10, 11].

Проведенные исследования ряда краевых задач математической физики [15] 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 мы преследуем цель – абсолютную точность, то все эти представления равнозначны. Но если наша цель – заданная ограниченная точность, то эти представления будут совершенно различны.

Самой слабой сходимостью обладают ряды Тейлора, с другой стороны самая сильная сходимость характерна для полиномов Чебышева [16, 9].

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

Идея метода заключается в том, что имеющийся в нашем распоряжении ряд Мак-Лорена телескопически сдвигается в гораздо более короткий ряд, не теряя в точности.

Для этого используется возможность представления любого степенного ряда через смещенные полиномы Чебышева на интервале [0,1].

Основные результаты настоящего раздела изложены в работах автора [17, 18].

Запишем общее решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, полученное модифицированным методом последовательных приближений через смещенные полиномы Чебыше-ва.

Напомним, что полиномом Чебышева первого рода от переменной $t = \cos\varphi$ является функция:

$$T_s(t) = \cos s\varphi,$$

а полиномом Чебышева второго рода от той же переменной $t = \cos\varphi$ будет функция

$$U_s(t) = \frac{\sin(s+1)\varphi}{\sin\varphi}.$$

Значения t расположены на отрезке от –1 до +1.

Имеют место условия ортогональности:

$$\int_{-1}^{1} \frac{T_m(t)T_s(t)dt}{\sqrt{1-t^2}} = \begin{cases} 0 & при\ m \neq s; \\ \frac{\pi}{2} & при\ m = s \neq 0; \\ \pi & при\ m = n = 0. \end{cases}$$

$$\int_{-1}^{1} U_m(t)U_s(t)\sqrt{1-t^2}\,dt = \begin{cases} 0 & при\ m \neq s; \\ \frac{\pi}{2} & при\ m = s \\ & (m, s = 0, 1, \ldots), \end{cases}$$

а также соотношения:

$$\int_{-1}^{1} \frac{T_m(t)dt}{\sqrt{1-t^2}(t-t_0)} = \begin{cases} 0 & при\ m = 0; \\ \pi U_{m-1}(t_0) & при\ m \neq 0. \end{cases}$$

В некоторых случаях нас интересует изменение t лишь в интервале (0, 1). В этом случае полагаем:

$$t = \frac{1-\cos\varphi}{2} = \sin^2\frac{\varphi}{2}$$

и определяем смещенные полиномы Чебышева первого ряда $T_s^*(t)$ по рекуррентной формуле:

$$T_{s+1}^*(t) = 2(1-2t)T_s^*(t) - T_{s-1}^*(t),$$

исходя из начальных условий:

$$T_0^*(t) = 0, \quad T_1^*(t) = 1 - 2t.$$

Аналогично определяются смещенные полиномы Чебышева второго рода с помощью той же рекуррентной формулы

$$U_{s+1}^*(t) = 2(1-2t)U_s^*(t) - U_{s-1}^*(t),$$

но исходя из начальных условий

$$U_0^*(t) = 1, \quad U_1^*(t) = 2(1-2t).$$

Запишем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (12) следующим образом:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{\nu=1}^{s} B_{\nu,m}X_\nu + f_m$$

m = 1, 2, …, s. (14)

Пусть переменные коэффициенты $B_{\nu,m}$ и свободные члены f_m представлены через смещенные полиномы Чебышева:

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

$$f_m = \sum_{r=0}^{q} f_{m,r}(d_r \cdot r!)^{-1}\sum_{k=0}^{r} a_k T_k^*(\xi). \qquad (15)$$

Здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения ξ^r в ряд по многочленам Чебышева $T_k^*(\xi)$.

В выражениях (15) $d_r = 1$ для r = 0 и $d_r = 2^{2r-1}$ для остальных r.

Общее решение системы уравнений (14) имеет вид [17, 18]:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{s} C_\mu \left[d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi)\delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] + \\ + \sum_{j=0}^{q} t_{m,j,0} \left[d_{j+1}(j+1)! \right]^{-1} \sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\xi) + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n} \quad (16)$$

где $t_{m,j,0} = f_{m,r}$ при j = r; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – постоянные интегрирования.

В решении (16) будет δ = 1, если m = μ и δ = 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 правую часть системы $\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{\nu=1}^{s} B_{\nu,m} X_\nu$.

Последующие приближения осуществляются по формулам:

$$X_{m,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,\mu,n,j} \left[d_{n+j-1}(n+j-1)! \right]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\xi); \\ X_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,nj} \left[d_{n+j-1}(n+j-1)! \right]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\xi), \quad (17)$$

где β = n (q + 3) – 2.

Системы фундаментальных функций (17) 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:

$$t_{m,\mu,n,j} = \\ = \sum_{\nu=1}^{s} \sum_{r=0}^{q} b_{\nu,m,r} t_{\nu,\mu,n-1,j-r} (n+j-1)^{-1} \prod_{\gamma=0}^{r} (n+j-1-\gamma); \\ t_{m,\mu,n,j} = \sum_{\nu=1}^{s} \sum_{r=0}^{q} b_{\nu,m,r} t_{\nu,\mu,n-1,j-r} (n+j-1)^{-1} \prod_{\gamma=0}^{r} (n+j-1-\gamma) \\ . \quad (18)$$

Постоянные C_μ, входящие в общее решение (16), находятся из граничных условий.

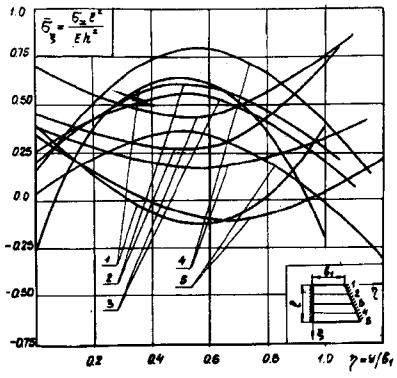

Рис.3. Эпюры нормальных напряжений $\bar{\sigma}_\xi$ в основных сечениях лопатки.

Запишем выражения для напряжений:

$$\bar{\sigma}_\xi = \frac{\sigma_{11} R^2}{Eh^2} = \frac{R}{(1-\nu^2)h} \left[\frac{l}{R} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \frac{l^2}{R^2} \bar{w} + \nu m \frac{l}{R} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \right. \\ \left. + \frac{h^2}{12R^2} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \xi^2} + \frac{l^2}{R^2} \bar{w} \right) \right] - \\ - \frac{1}{2(1-\nu^2)} \left[\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \xi^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \eta^2} + \frac{l^2}{R^2} \bar{w} \right];$$

$$\bar{\sigma}_\eta = \frac{\sigma_{22} R^2}{Eh^2} = \frac{R}{(1-\nu^2)h} \times \\ \times \left[\frac{ml}{R} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \nu \left(\frac{l}{R} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \frac{l^2}{R^2} \bar{w} \right) - \frac{m^2 h^2}{12R^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \eta^2} \right] - \\ - \frac{1}{2(1-\nu^2)} \left[\frac{ml}{R} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \frac{\nu l}{R} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} - m^2 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \eta^2} - \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \xi^2} \right];$$

$$\bar{\sigma}_{\xi\eta} = \frac{\sigma_{12} R^2}{Eh^2} = \frac{R}{(1+\nu)h} \times \\ \times \left[\frac{ml}{R} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \eta} + \frac{l}{R} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \xi} + \frac{mh^2}{12R^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \xi \partial \eta} \right] - \\ - \frac{1}{4(1+\nu)} \left[\frac{l}{R} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \xi} - \frac{ml}{R} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \eta} + 2m \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \xi \partial \eta} \right]. \quad (19)$$

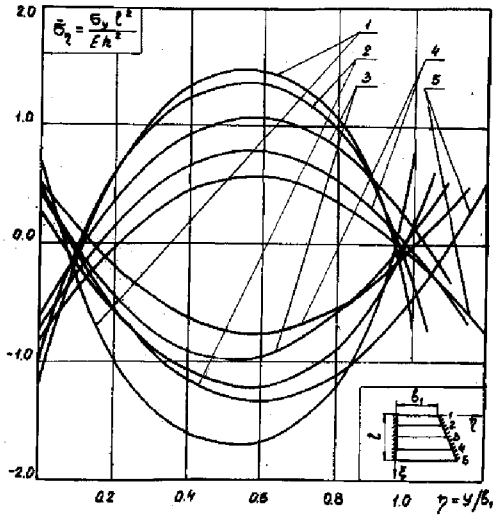

Рис.4. Эпюры нормальных напряжений $\bar{\sigma}_\eta$ в основных сечениях лопатки.

С учетом выражения (10) выражения (19) перепишутся следующим образом:

$$\bar{\sigma}_\xi = \frac{R}{(1-\nu^2)h} \left[\frac{l}{R} \left(P_{1,22} X_7 + P_{2,22} X_8 \right) + \right. \\ + \frac{l^2}{R^2} \left(P_1 X_5 + P_2 X_6 \right) + \frac{\nu m l}{R} \left(P_{1,22} X_3 + P_{2,22} X_4 \right) - \\ \left. - \frac{h^2}{12R^2} \left(P_1 X_{13} + P_2 X_{14} - \frac{l^2}{R^2} P_1 X_5 - \frac{l^2}{R^2} P_2 X_6 \right) \right] -$$

$$-\frac{1}{2(1-\nu^2)}\Big[P_1X_{13}+P_2X_{14}+\nu m^2\left(P_{1,22}X_5+P_{2,22}X_6\right)+$$
$$+\frac{l^2}{R^2}\left(P_1X_5+P_2X_6\right)\Big];$$
$$\overline{\sigma}_\eta=\frac{R}{(1-\nu^2)h}\Big[\frac{ml}{R}\left(P_{1,22}X_3+P_{2,22}X_4\right)+$$
$$+\frac{\nu l}{R}\left(P_{1,22}X_7+P_{2,22}X_8\right)+\frac{\nu l^2}{R^2}\left(P_1X_5+P_2X_6\right)-$$
$$-\frac{m^2h^2}{12R^2}\left(P_{1,22}X_5-P_{2,22}X_6\right)\Big]-$$
$$-\frac{1}{2(1-\nu^2)}\Big[\frac{ml}{R}\left(P_{1,22}X_3+P_{2,22}X_4\right)+$$
$$+\frac{\nu l}{R}\left(P_{1,22}X_7+P_{2,22}X_8\right)-$$
$$-m^2\left(P_{1,22}X_5+P_{2,22}X_6\right)-\nu\left(P_1X_{13}+P_2X_{14}\right)\Big];$$
$$\overline{\sigma}_{\xi\eta}=\frac{R}{(1+\nu)h}\Big[\frac{ml}{R}\left(P_{1,22}X_1+P_{2,22}X_2\right)+$$
$$+\frac{1}{R}\left(P_{1,22}X_9+P_{2,22}X_{10}\right)+$$
$$+\frac{mh^2}{12R^2}\left(P_{1,2}X_{11}+P_{2,2}X_{12}\right)\Big]-$$
$$-\frac{1}{4(1+\nu)}\Big[\frac{l}{R}\left(P_{1,22}X_9+P_{2,22}X_{10}\right)-$$
$$-\frac{ml}{R}\left(P_{1,22}X_1+P_{2,22}X_2\right)+2m\left(P_{1,2}X_{11}+P_{2,2}X_{12}\right)\Big]. \quad (20)$$

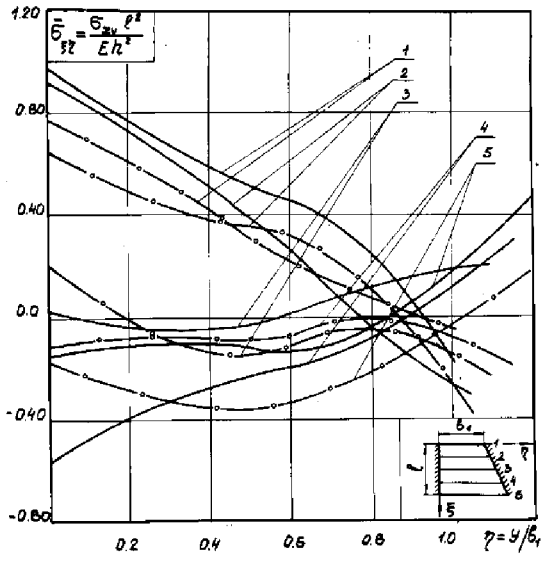

Рис.5. Эпюры касательных напряжений $\overline{\sigma}_{\xi\eta}$ в основных сечениях лопатки.

Анализ численных результатов

В соответствии с изложенным алгоритмом была составлена программа численной реализации разработанного аналитического решения.

Приводился расчет лопатки центробежного насоса большой кривизны. Исходные данные для расчета. Для колеса: R_k = 400 мм; z = 8 – количество лопаток; $\beta_2 = 42^o$; n = 2600 об/мин. Для лопатки: l = 260 мм; m = 2; $R_л$ = 280 мм; h = 6 мм; α = 0; $\gamma_1 = 18^o$. Материал лопатки – Сталь-20. Лопатка представляет собой непологую оболочку – отношение стрелы подъема – f к меньшей стороне лопатки – b составляет $f/b \approx \frac{1}{4} < \frac{1}{5}$.

Результаты расчетов представлены на рис.3-5. Как следует из анализа результатов наиболее напряженной является выходная кромка лопатки.

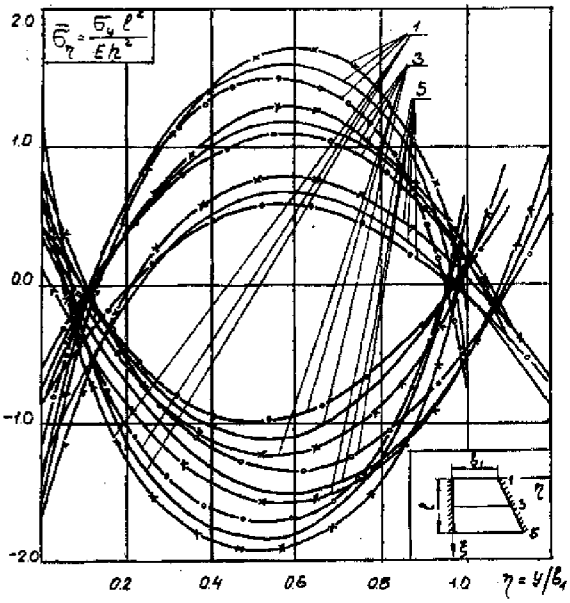

Рис.6. Распределение нормальных напряжений $\overline{\sigma}_\eta$ в основных сечениях лопатки:

——— – по теории пологих оболочек;
——— ——o – по теории непологих оболочек;
——— ——x – результаты эксперимента.

Важным является вопрос о границах применимости теории пологих и непологих оболочек к расчету напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток центробежных насосов. На рис.6 представлены результаты сравнения двух расчетов: по теории пологих и непологих оболочек. Как следует из анализа данных расчета результаты отличаются незначительно.

Проведенное тензометрирование реальных

колес показало, что расчет по теории пологих оболочек более соответствует реальной картине напряженного состояния лопатки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополя в рамках научного проекта №18-48-920002.

Список литературы

1. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Померанская А.К., Москвичева Н.Н. Прочность и вибропрочность профилированных лопаток центробежных насосов гидроэнергетики. – Тезисы доклада 12-й НТК «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии». – Санкт-Петербург, 15-16 ноября 2018. – ГК «РусГидро», 2018, с.
2. Пухлий В.А., Борисов В.К. Приложение теории непологих оболочек к расчету на прочность лопаток шахтных турбомашин. – Известия АН СССР, Механика твердого тела, 1980, №1, с.172.
3. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
4. Ляв А. Математическая теория упругости. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – 674 с.
5. Love A. On the small free vibrations and deformation on thin elastic shell. – Phil. Trans. Rog. Soc., 1888, vol.179, p.491-546.
6. 6.Галерин Б.Г. Собрание сочинений. Т.1-2.-М.: Изд-во АН СССР, 1952.
6. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя. – Журн. прикл. матем. и техн. физики, 1960, №3, с.111-118.
7. Бернштейн С.Н. О наилучшим приближении непрерывных функций посредством многочленов данной степени. – Сочинения. Т 1. – М.: Изд-во АН СССР, 1952, с.11-104.
8. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации. – М.: Изд-во Мир, 1980. – 510 с.
9. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. вычислит. матем. и матем. физики, 1978, том 18, №5, с.1275-1282.
10. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. - Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11, с.2039-2043.
11. Пухлий В.А. Об ускорении сходимости решения в модифицированном подходе последовательных приближений. – Ж-л «Обозрение прикладной и промышленной математики», М., 2016, том 23, вып.4, с.381-383.
12. Пухлий В.А. Численные методы. Теория и практикум в среде MATLAB: в 2-х томах. Том I – Севастополь, 2007. – 412 с. Том 2 - Севастополь, 2008. – 742 с.
13. Канторович Л.В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений. – Сиб. матем. журнал, 1962, том 3, №5, с.701-709.
14. Пухлий В.А., Харченко А.Г. К теории трехслойных изотропных оболочек переменной жесткости. – Известия АН СССР, Механика твердого тела, 1982, №5, с.116-123.
15. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
16. Пухлий В.А. Аналитический метод решения краевых задач теории оболочек. – В кн.: Труды XIII Всесоюзной конф. и теории пластин и оболочек. - Таллин, 1983.
17. 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.

References

1. Pukhliy V. A, Miroshnichenko S.T., Pomeranskaja A.K., Moskvichova N.N. Durabilit and vibration strength профилированных shovels of centrifugal pumps of water-power engineering. - theses of the report of 12th НТК «Water-power engineering. Hydraulic engineering. New workings out and technologies». - St.-Petersburg, on November, 15-16th 2018. - ГК «РусГидро», 2018, p.
2. Pukhliy V. A, Borisov V. K. The application of the theory of not flat covers to calculation on durability of shovels of mine turbomachines. - News AH the USSR, Mechanics of a firm body, 1980, №1, с.172.
3. Vlasov V. Z. The general theory of covers and its application in the technician.--l M.: Гостехиздат, 1949. - 784 p.
4. Lyav A. Matematicheskaja the elasticity theory.--l M.: ОНТИ, 1935. - 674 p.
5. Love A. On the small free vibrations and deformation on thin elastic shell. – Phil. Trans. Rog. Soc., 1888, vol.179, p.491-546.
6. Galerkin B.G. Collected works. T.1-2.-M.: Publishing house AN of the USSR, 1952.
7. Dorodnizin A.A. About one method of the decision of the equations of a laminar interface. - Журн. прикл. матем. And техн. Physicists, 1960, №3, p.111-118.
8. Bernstein C.H. About the best approach of continuous functions by means of multinomials of the given degree. - compositions. T 1. - M: Publishing house AN of the USSR, 1952, p.11-104.
9. Luk J. Spetsialnye's hatch mathematical functions and their approximations. - M: Publishing house the World, 1980. - 510 p.
10. Pukhliy V. A. A method of the analytical decision of two-dimensional regional problems for systems of the elliptic equations. - Журн. Will calculate. матем. And матем. Physicists, 1978, volume 18,

№5, p.1275-1282.

11. Pukhliy V. A. About one approach to the decision of regional problems of mathematical physics. - the differential equations, 1979, volume 15, №11, p.2039-2043.
12. Pukhliy V. A. About acceleration of convergence of the decision in the modified approach consecutive приближений. - Ж-л «a review of applied and industrial mathematics», M, 2016, volume 23, вып.4, p.381-383.
13. Pukhliy V. A. Numerical methods. The theory and a practical work in the environment of MATLAB: in 2 volumes. Volume I - Sevastopol, 2007. - 412 with. Volume 2 - Sevastopol, 2008. - 742 p.
14. Kantorovich L.V. About some new approaches to computing methods and processing of supervision. - Сиб. матем. Magazine, 1962, volume 3, №5, p.701-709.
15. Pukhliy V. A, Harchenko A.G. To the theory of three-layer isotropic covers of variable rigidity. - news AH the USSR, Mechanics of a firm body, 1982, №5, p.116-123.
16. Lanzosh K. Prakticheskie methods of the applied analysis. - M: Физматгиз, 1961. - 524 p.
17. Pukhliy V. A. An analytical method of the decision of regional problems of the theory of covers. - in кн.: Works of XIII All-Union конф. And theories of plates and облочек. - Tallinn, 1983.
18. Pukhliy V. A. The decision of a problem on a bend oblique-angled in respect of the cylindrical three-layer panel the modified method consecutive приближений. - The Applied mechanics, 1986, volume 22, №10, p.62-67.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.039.56

Диагностика состояния блоков ядерных энергетических установок на основе статистических методов

С.А. Качур[1], А.А. Скидан[2], Н.В. Шахова[3], К.П. Аникевич[4], Е.Н. Давиденко[5]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru[1], nata_shachova_73@mail.ru[3], anikonst@mail.ru[4],davi-helen@yandex.ru[5]

Статья поступила 08.10.2018 г.; после доработки 10.10.2018 г.

Аннотация

Предложен подход к усовершенствованию программного обеспечения автоматизированных систем контроля. Разработаны два метода, позволяющие идентифицировать и прогнозировать состояние объекта на основе обработки статистической информации.

Ключевые слова: ядерный реактор, автоматизированная система контроля, диагностика, идентификация, прогнозирование, статистические методы.

Diagnostics of the State of Blocks Nuclear Energy Installations based on Statistical Methods

S.A. Kachur[1], A.A. Skidan[2], N.V. Shakhova[3], K.P. Anikevich[4], E.N. Davidenko[5]
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru ru[1], nata_shachova_73@mail.ru[3], anikonst@mail.ru[4],davi-helen@yandex.ru[5]

Received 08.10.2018 y.; received in final form 10.10.2018 y.

Abstract

An approach to the improvement of software of automated control systems is proposed. Two methods have been developed to identify and predict the state of an object based on the processing of statistical information.

Keywords: nuclear reactor, automated control system, diagnostics, identification, prediction, statistical methods

Введение

Определение технического состояния оборудования – одна из наиболее сложных задач в области эксплуатации ЯЭУ. Как правило, наиболее трудоемкая часть работы персонала АС заключается в выполнении работ по контролю технического состояния оборудования и систем, а также поиску возникающих в них повреждений и отказов [1].

Техническое состояние при этом понимается как совокупность подверженных изменению в процессе эксплуатации свойств объекта, которые характеризуются в определенный момент времени признаками, установленными нормативной документацией на данный объект. Признаками технического состояния могут быть определенные значения количественных и качественных характеристик свойств оборудования и систем ЯЭУ, для которых определены допустимые об-

ласти существования. Фактические значения этих характеристик определяют техническое состояние объекта, В зависимости от фактических значений признаков различают следующие виды технического состояния оборудования и систем ЯЭУ: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, правильное функционирование, неправильное функционирование.

Переход оборудования и систем АС из одного состояния в другое может осуществляться двумя путями: во-первых, скачкообразно вследствие повреждения или отказа (внезапный отказ) или, во-вторых, постепенно вследствие износа и старения (постепенный, параметрический отказ).

Внезапный отказ, обусловленный повреждением или усталостным разрушением элемента конструкции, обычно легко выявляется при визуальном контроле. Значительно сложнее бывает выявить параметрический отказ. В этом случае, если отсутствуют индикаторы отказа, приходится осуществлять проверку работоспособности оборудования или системы, в процессе которой выявляется предотказовое состояние или сам отказ, если таковой имеет место. Правильно и своевременно организованный контроль снижает вероятность появления отказов.

Анализ [1-4] существующих методов контроля и диагностики отказов и аварийных ситуаций позволил сделать выводы о целесообразности применения для диагностики параметрических отказов оборудования ЯЭУ статистических методов обработки информации [5, 6], получаемой от измерительных систем (датчиков) и, как следствие, необходимости усовершенствования схемы функционирования автоматизированной системы контроля.

Цели и задачи исследования

Цель исследования – создание быстродействующих и простых методов диагностики состояния блоков ЯЭУ на основе статистической обработки данных об их функционировании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) анализ функционирования существующих автоматизированных систем контроля для определения возможности их усовершенствования;
2) создания метода идентификации состояния блока АСК на основе статистической информации;
3) разработка метода прогнозирования развития ситуации и предупреждение возможного отказа блока ЯЭУ.

Функциональная схема существующих АСК с учетом методов статистической диагностики

На АС для контроля технического состояния оборудования и систем, а также для контроля технологического процесса производства тепловой и электрической энергии нашли широкое применение автоматические и автоматизированные системы контроля [1].

Рис. Обобщенная функциональная схема АСК

На рисунке приведена обобщенная функциональная схема автоматизированной системы контроля (АСК), которая дает представление о том, с помощью каких технических средств должны решаться задачи диагностики. Как следует из данной схемы, получение исходной информации о состоянии объекта контроля обеспечивается с помощью блока измерительных устройств.

В состав измерительных устройств входят как датчики входных и выходных сигналов (параметров) объекта, так и вторичные измерительные преобразователи, осуществляющие усиление и нормирование сигналов, приведение их к виду, более удобному для последующей обработки (непрерывный сигнал или цифровой код), компенсацию погрешностей датчиков и предварительную фильтрацию помех, вычисление ряда контролируемых параметров.

В ЭВМ (универсальной или специализированной) происходит сравнение контролируемых параметров с их предельно допустимы ми значениями (границами поля допуска, уставками), формирование указанных допусков в соответствии с режимами работы оборудования и изменением внешних условий, экстраполяция значений отдельных параметров, принятие решения о работоспособности объекта в текущий или будущий момент времени. В АСК диагностического типа в ЭВМ записывается (хранится) испытательная программа, определяющая перечень необходимых проверок и очередность их выполнения, а также те формальные правила, применение которых позволяет локализовать возникшую неисправность.

Блок формирования зондирующих сигналов обеспечивает подачу на входы объекта некоторой совокупности управляющих воздействий, обеспечивающих тот или иной режим его работы. Эти сигналы часто называют стимулирующими (имитирую тестовыми, пробными). Данный блок управляется с помощью блока управления который по командам из ЭВМ осуществляет изменение вида и уровня зондирующих сигналов, включение и подготовку к работе контролируемого объекта, последовательное подключение измерителей к соответствующим его выходам и др. По этим же командам проводится и управление работой блока исполнительных устройств, которые выполняют восстановительные функции по отношению к рассматриваемому объекту (включение резервных элементов, регулировку и т.п.).

Информация о фактическом состоянии объекта контроля, полученная с помощью измерительных устройств и обработанная в соответствии с определенным алгоритмом в ЭВМ, поступает далее в блок отображения выходной информации, где она преобразуется в форму, наиболее удобную для восприятия ее оператором или регистрации на соответствующих оконечных устройствах, входящих в состав АСК. При этом имеется в виду, что присутствие оператора вносит определенный элемент творчества и ответственности в работу АСК, способствует принятию правильных решений в сложных и непредвиденных ситуациях, позволяет оперативно менять программу контроля (а иногда и законы управления объектом) в соответствии с изменением обстановки.

Предлагается усовершенствовать программную часть АСК за счет использования методов статистической диагностики (МСД) блоков ЯЭУ, к которым относятся:

- метод идентификации состояния блока ЯЭУ на основе статистической информации;
- метод прогнозирования отказа блока ЯЭУ на основе статистической информации.

Метод идентификации состояния блока ЯЭУ на основе статистической информации

Стандартной вероятностной моделью наблюдаемого процесса является распределение множества значимых параметров (вектора случайных величин) данного процесса на заданном интервале времени. Один из путей определения множества значимых параметров – применение факторного анализа.

Распределение параметров технических систем, в том числе оборудования ЯЭУ, описывается нормальным законом. Нормальное распределение возможно в том случае, когда на величину параметра влияет большое число причин. Действие этих причин независимо, и ни одна из причин не имеет преобладающего влияния. Показано, что ЯЭУ может быть описана как стохастическая система переменной структуры.

На практике при обработке информации анализируется не генеральная совокупность случайной величины, а ее выборка.

Средняя квадратическая (стандартная) ошибка выборки зависит от объема выборки и степени вариации параметра в генеральной совокупности. Уменьшение стандартной ошибки выборки, а, следовательно, увеличение точности оценки, всегда связано с увеличением объема выборки. В этой связи уже на стадии органи-

зации выборочного наблюдения приходятся решать вопрос о том, каков должен быть объем выборочной совокупности, чтобы была обеспечена требуемая точность результатов наблюдений. Если распределение параметра в генеральной совокупности может быть отнесено к нормальному закону (размах вариации примерно равен 6σ), то для простой случайной повторной выборки в результате несложных преобразований формула расчета ее объема имеет следующий вид

$$n = \frac{(x_{\max} - x_{\min})^2}{\Delta^2}, \qquad (1)$$

где ($x_{\max}$-x_{mix}) – размах вариации параметра x по генеральной совокупности; Δ – величина допустимого среднего квадратического отклонения параметра, определяемая по нормативной документации для исследуемого оборудования.

Для проверки статистической гипотезы о соответствии эмпирического и теоретического законов распределения наиболее часто используют критерий согласия «хи-квадрат» (χ^2), предложенный К. Пирсоном

$$\chi^2(k-s-1) = \sum_{i=1}^{k} \frac{(\nu_i - \nu'_i)^2}{\nu'_i}, \qquad (2)$$

где ν и ν′ – соответственно частоты эмпирического и теоретического распределений на i-м интервале ($i = \overline{1,k}$); s – число параметров закона распределения (для нормального закона распределения s=2).

Определив значение критерия Пирсона по данным конкретной выборки при заданном уровне значимости α (обычно принимают α=0,05), получают значение вероятности p, с которым можно ожидать, что исследуемые данные описываются нормальным законом(при s=2).

Если эмпирическое распределение анализируемого параметра статистически значимо отличается от теоретического, т.е. p значительно меньше 0,95, то имеются основания предполагать, что режим работы оборудования в системе не соответствует проектному.

Заключение об управляемости объекта производится на основании анализа выборочного среднего квадратического отклонения σ для его исследуемых параметров. Расчет эмпирических выборочных показателей закона распределения производится по формулам

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n_i} x_i, \qquad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n_i} (x_i - \bar{x})^2, \qquad (4)$$

где $\bar{x}$ – среднее выборочное значение.

В случае, если предельные значения $x_{\max}$ и x_{mix} исследуемого параметра x, определенные по генеральной совокупности, выходят за пределы $\bar{x} \pm 3\sigma$, то технологический процесс считается не управляемым.

Для описания процесса воспользуемся понятием сигнатура модели.

В математике моделью называется некоторое множество М с заданным на нем набором отношений $\{r_1, r_2, \ldots, r_n\}$.

Для выделения «родственных» моделей, допускающих объединение в общий класс, вводится понятие сигнатуры.

Сигнатурой модели называется набор названий отношений в этой модели, причем для каждого названия должна быть указана местность соответствующего отношения.

«Модель в сигнатуре» – это не только конкретная модель, но и указание класса родственных ей моделей с той же сигнатурой.

Для модели состояния блока ЯЭУ под множеством состояний будем понимать множество законов распределения значимых сигналов оборудования, контролируемого в предотказный период. Под отношениями модели подразумевается соответствие распределения сигналов оборудования в предотказный период теоретическому закону распределения.

Сопоставляя на структурной схеме блока каждому конкретному оборудованию вероятность p соответствия реального распределения параметров теоретическому, позволяет составить статистическое описание ситуации («статистический портрет») для текущего момента времени. Наличие банка данных сигнатур аварийных ситуаций дает возможность идентифицировать возможную аварию или отказ системы.

Предлагается ввести понятие «сигнатура ситуации».

Под сигнатурой ситуации будем понимать l-мерный бинарный вектор BB, в котором i-й элемент равен 1, если отказало i-е оборудова-

ние, и 0 в противном случае (l – количество контролируемого оборудования в блоке).

В сигнатуре текущей ситуации (векторе BT) i-й элемент равен 1, если $p_i>\alpha$, и 0 в противном случае.

Введение сигнатуры ситуации позволяет упростить логический модуль распознавания текущей ситуации, сведя классификацию объекта диагностирования к элементарным логическим операциям над двоичными векторами в процессе перебора. Число шагов алгоритма перебора невелико, так как определяется мощностью множества возможных аварийных ситуаций.

Процесс контроля параметров является дискретным во времени и имеет шаг дискретизации Δt. Чтобы повысить быстродействие процесса диагностики предлагается рассчитывать шаг обработки данных отдельно по каждому i-у оборудованию в зависимости от значения вероятности p_i по формуле

$$\Delta t_i = n\Delta t / p_i. \qquad (5)$$

Предложенный подход к анализу статистической информации о функционировании блоков ЯЭУ, был положен в основу метода комплексной диагностики блоков ЯЭУ.

Предлагаемый метод предусматривается применение вычислительной техники, существующих прикладных программных пакетов для обработки статистической информации и математического моделирования.

Основные этапы метода комплексной диагностики блоков ЯЭУ [126].

1. Определение в соответствии с формулой (1) объемов выборок для исследуемых генеральных совокупностей по каждому анализируемому параметру.

2. Проверка статистической гипотезы о соответствии экспериментальных данных теоретическому (нормальному) закону распределения анализируемой случайной величины (для каждого анализируемого параметра) по критерию Пирсона (2)).

3. Проверка экспериментальных данных в соответствии с правилом $\pm 3\sigma$ (3, 4).

4. Выдача рекомендаций оператору на основе анализа состояния подсистем (оборудования) исследуемого блока.

5. Составление вероятностной модели текущего состояния блока на основе вероятностных характеристик параметров, входящего в него оборудования. Расчет сигнатуры BT текущей ситуации. Определение множества векторов (или вектора) BB, для которых (которого) вес (т.е. число единиц) вектора $TT=BT\&BB$ наибольший. Полученное множество сигнатур идентифицирует ситуацию. Выдача рекомендаций оператору.

6. Следующая итерация данного метода (п.1) для каждого оборудования происходит через промежуток времени Δt_i, который определяется по формуле (5). Не анализируемые в соответствующий период времени характеристики сохраняют свои значения.

Метод прогнозирования отказа блока ЯЭУ на основе статистической информации

Обработка данных производится с использованием существующих прикладных программных статистических пакетов, впоследствии ее результат помещаются в банк данных. При отсутствии необходимых реальных экспериментальных данных по определенному виду аварий, можно воспользоваться результатами имитационного моделирования. Простейшей имитацией для данного случая является генерация случайных чисел с заданными показателями закона распределения и допустимыми пределами величин сигналов.

Метод обработки статистической информации об аварийной ситуации включает следующие этапы.

1. Установка начальных значений вектора сигнатуры ситуации $BB:=0$ и перечня значимых параметров оборудования (пустой перечень).

2. Определение объемов выборок для исследуемых генеральных совокупностей по каждому анализируемому сигналу в соответствии с формулой (1).

3. Получение для каждого контролируемого сигнала периодической выборочной совокупности с периодом

$$T = \left[\frac{N}{n}\right],$$

где N – объем генеральной совокупности.

4. Проверка статистической гипотезы о соответствии экспериментальных выборочных данных теоретическому (нормальному) закону распределения анализируемой случайной величины (для каждого анализируемого параметра) по критерию Пирсона.

5. Формирование перечня значимых параметров оборудования. Добавление в перечень сигналов, для которых вероятность p_i соответ-

ствия реального распределения теоретическому меньше α.

6. Построение сигнатуры ситуации. Присвоение i-у разряду вектора BB значения 1, если хотя бы для одного сигнала i-о оборудования вероятность p_i соответствия экспериментального распределения теоретическому меньше α.

7. Если имеется несколько описаний исследуемого типа аварии, то для каждого из них выполняем п.п.2-6 до тех пор, пока вся имеющаяся информация не будет проанализирована.

8. Если перечень значимых сигналов для некоторого оборудования пуст, то для данного оборудования добавляем априори известный перечень теоретически значимых сигналов.

Для более полного анализа информации рекомендуется выполнить следующую последовательность действий с использованием любого статистического программного пакета.

1) Проверка гипотезы о соответствии распределений параметров блока нормальному закону на основе полученной выборки.

2) Построение тренда для каждого из параметров.

3) Проведение регрессионного анализа.

Построение графиков регрессии для результирующего показателя и входных параметров и определение уравнений регрессионных зависимостей в случае:

- линейной модели регрессии;
- модели регрессии в виде параболы.

4) Определение коэффициента детерминации для моделей всех вариантов.

5) Построение корреляционной матрицы для заданных параметров X1, X2, X3.

6) Проведение однофакторного дисперсионного анализа для выявления наличия влияния фактора времени на результирующий показатель.

7) Составление прогноза.

Прогноз параметрического отказа будет в том случае, если выполняются любые три из перечисленных ниже условий:

а) в п.1 не выполняется правило $\pm 3\sigma$, т.е. значение выборочной дисперсии превышает допустимую величину σ;

б) в п.2 уравнение тренда не описывается константой;

в) в п.3 данные измерений лучше описываются нелинейной функцией, т.е. для нее коэффициент детерминации больше, чем для линейной функции;

г) в п.4 наличие корреляции между факторами;

д) в п.5 выявлено влияние фактора Y.

Достоинствами данного метода являются: повышение быстродействия при идентификации ситуации; прогнозирование аварийных ситуаций за счет наличия вероятностных характеристик; простота применения; отсутствие необходимости дополнительного технического оснащения.

Заключение

Предложен подход к усовершенствованию программного обеспечения АСК. Разработаны два метода, позволяющие идентифицировать и прогнозировать состояние объекта на основе обработки статистической информации. Модель объекта диагностирования позволяет упростить статистическую классификации за счет введения сигнатуры ситуации и использования возможностей математического аппарата булевой алгебры. Метод статистической диагностики ЯЭУ дает возможность снизить размерность задачи за счет учета вероятностных характеристик сигналов, влияющих на периодичность анализа состояния конкретного оборудования. Кроме того, расчет вероятностных характеристик ведется не на основе генеральной совокупности, а на результатах выборки, объем которой зависит от экспериментальных данных.

Достоинствами данного метода являются: повышение быстродействия при идентификации ситуации; прогнозирование аварийных ситуаций за счет наличия вероятностных характеристик; простота применения; отсутствие необходимости дополнительного технического оснащения.

Диагностирование технических систем на этапе эксплуатации позволяет существенно повысить уровень надежности, сократить потери из-за отказов и простоев, уменьшить трудоемкость обслуживания. Получаемая при диагностировании информация является основой для оптимального управления эксплуатацией оборудования ЯЭУ. Предполагается, что предложенный метод диагностики состояния блоков ЯЭУ будет использован для усовершенствовании существующих АСК.

Список литературы

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций./ В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. –928с.
2. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами/ И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; Под общ.

ред. акад. Н.А. Доллежаля – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
3. Емельянов И.Я. Управление и безопасность ядерных энергетических установок/ И.Я. Емельянов, П.А. Гаврилов, Б.Н. Селиверстов – М.:Атомиздат, 1975. –280с.
4. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками/ В.А. Еременко – К.: Тэхника, 1988. – 256с.
5. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных./Под ред. С.А. Айвазяна – М.:Финансы и статистика,1983. – 471с.
6. Ллойд Э., Ледерман У. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. – М.: Финансы и статистика, 1990.

References

1. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluataciya atomnyh stancij* [Operation of nuclear power plants]. Moskow, Energoizdat, 1999. 928p.
2. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Naucho-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical government bases by nuclear reactors]. Moskow, Energoizdat, 1981. 360p.
3. Emel'yanov I.Ya., Gavrilov P.A., Seliverstov B.N. *Upravlenie i bezopasnost' yadernyh energeticheskih reaktorov* [Control and safety of nuclear power reactors]. Moskow, Atomizdat, 1975. 280p.
4. Eremenko V.A. *Puti obespecheniya bezopasnogo upravleniya atomnymi energeticheskimi ustanovkami* [Ways of providing of safe management by the atomic power plants]. Kiev, Techika, 1988. 256p.
5. Ajvazyan S.A. *Prikladnaya statistika: osnovy modelirovaniya i pervichaya obrabotka dannyh* [Applied statistics: basics of modeling and primary data processing] Moskow, Finansy i statistika,1983. 471p.
6. Llojd E., Lederman Y. *Spravochnik po prikladnoj statistike* [Handbook of Applied Statistics] Moskow, Finansy i statistika, 1990.

УДК 534.2:532.5

Гидродинамическая акустика. Сообщение 1. Структурный подход к уравнениям движения

В.А.Пухлий[1], С.Т.Мирошниченко[1]; В.В.Соколов[1], К.В.Пухлий[2]
[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7
г.Севастополь, 299015, Россия, e-mail: pu1611@rambler.ru
[2]АО «Аэротекс», 127349, Москва, ул.Мурановская, 17-147

Статья поступила 24.10.2018 г.; посла доработки 29.10.2018 г.

Аннотация

Рассмотрены структурные модели обтекания тел и модель струйного истечения, составляющими элементами которых являются вихревые образования. Структурные образования типа вихря-решетки и активной вихревой дорожки в различных сочетаниях позволяют строить расчетных схемы отрывных обтеканий различных тел с вычислением аэродинамической силы сопротивления и кинетики ближнего следа.

Ключевые слова: структурные модели, вихревые образования, вихрь-решетки, отрывные течения, кинетика ближнего следа.

Hydrodynamic acoustics. The message 1. The structural approach to the movement equations

V.A.Pukhliy[1], S.T.Miroshnichenko[1], V.V.Sokolov[1], K.V.Pukhliy[2]
[1]Sevastopol state University, 299015, Russia, Sevastopol, Kurchatova Street, 7
[2]Aeroteks Enterprise, 127349, Moscow, street Muranovsky, 17-147

Received 24.10.2018 y.; received in final from 29.10.2018 y.

Abstract

Structural models of a flow of bodies and model of the jet expiration are considered, making which elements are vortical educations. Structural educations of type of a whirlwind-lattice and an active vortical path in various combinations allow to build settlement schemes fragmented flows of various bodies with calculation of aerodynamic force of resistance and kinetics a near trace.

Keywords: structural models, vortical educations, whirlwinds-lattices, fragmented currents, kinetic a near trace

Введение

Современные тенденции в области турбомашиностроения связаны с применением и разработкой высокоэффективных машин, работающих при высоких окружных скоростях. Следует отметить, что работа турбомашин (насосов, компрессоров, нагнетателей) при таких нагрузках обуславливает нестационарность режимов обтекания решетки профилей, вследствие чего мы сталкиваемся с третьей проблемой нестационарности – звуком аэродинамического происхождения. Однако, именно этот звук, играющий в большинстве случаев главную роль, является и до настоящего времени наименее исследованным.

Научное понимание вопросов, связанных с аэродинамическим звуком, начало складывается в последние десятилетия благодаря усилиям Е.Я.Юдина [1], Д.И.Блохинцева [2], Керла [3],Лайтхилла [4], Пауэлла [5], Рибнера [6], Джонса [7] и др., положивших начало развитию нового раздела науки, так называемой

аэродинамической акустики.

Как уже было сказано ранее, возникновение звука в дозвуковом потоке всегда связано с нестационарным движением некоторого жидкого объема [2]. Объект возникновения этого нестационарного движения, например, обтекаемое твердое тело, может быть совершенно неподвижным, хотя в общем случае это необязательно.

Вышеприведенное условие возникновения звука требует дополнительной расшифровки. Дело в том, что всякий жидкий объем, ответственный за создание акустического поля, является либо элементом структуры, либо сам представляет из себя некую более или менее сложную структуру, например, вихревое образование и др. Трансформация такого «структуризованного» жидкого объема в пространстве-времени связана, во-первых, с созданием определенного гидродинамического поля, отвечающего заданным граничным условиям, во-вторых, с взаимодействием в свободном потоке (например, турбулентный след вдали от движущегося или обтекаемого тела, основной участок струи и т.д.).

Таким образом, налицо неразрывное переплетение задач – аэрогидродинамической и акустической, причем решение первой разрешает структуру акустического поля на любом участке, в том числе на ближнем (псевдозвук).

Введение в теоретический анализ дискретных вихревых структур, предложенное в ряде работ В.А.Пухлия и И.Я Хвощевского [8, 9], позволили по новому подойти к решению задач аэрогидродинамики и аэродинамической акустики.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение проблем современного состояния аэрогидродинамической акустики и построение структурного подхода к уравнениям движения в гидромеханике и аэрогидродинамической акустике.

Современное состояние аэрогидродинамической акустики

С точки зрения исторической достоверности необходимо отметить, что впервые систематические исследования, связанные с направлением аэродинамической акустики были предприняты Е.Я.Юдиным в начале 40-х годов [1]. Им была получена формула для звуковой мощности вихревого шума, создаваемого неподвижным цилиндрическим стержнем, обтекаемым потоком:

$$P = k\frac{\rho_0}{c}\left(C_x \cdot Sh\right)^2 v^6 lD, \qquad (1)$$

где k – безразмерный коэффициент пропорциональности; C_x – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления; v – скорость потока вдали от тела; l – длина стержня; D – поперечный его размер; ρ_0 – плотность; Sh – число Струхаля; c – скорость звука.

Е.Я.Юдиным впервые была высказана мысль о том, что звук образуется из-за возникновения в области верхней и нижней границ обтекаемого неподвижного тела пульсирующей силы, являющейся причиной возникновения дипольного звука, что нашло отражение в вышеприведенной формуле.

И до настоящего времени результаты Е.Я.Юдина имеют важное значение на пути познания природы аэродинамического звука. Однако его выводы, связанные с появлением силового пульсирующего поля на границе тела, ответственного за дипольный звук, нуждаются в дальнейшем развитии их на область свободного потока.

Наиболее общим и важным при анализе акустического излучения является вопрос о причинном характере возникновения и изменения акустического поля, а также о форме его, проявляющейся на фоне изменяющегося аэродинами-ческого поля. Решение этого вопроса связано с различием движения в несжимаемой и слабо сжимаемой жидкости и определяется не только конечной скоростью распространения возмущения в слабо сжимаемой среде, но и возникновением (в результате появления новых степеней свободы) двух видов полей: гидродинамического и акустического. Возникает вопрос: идентичны ли изменения этих полей в пространстве и времени или изменения этих полей, а значит и их форм, отличны друг от друга, хотя и определяются общим источником возмущения.

Д.И.Блохинцев [2], анализируя возникновение звука при обтекании тела (цилиндра) с образованием дорожки Кармана [11], теоретически обосновывает возникновение дипольного излучения при принятии условия периодического отрыва вихрей с верхней и

нижней сторон тела. Доказательство ведется с помощью теоремы Кирхгофа, позволяющей по значениям потенциала и его производной на произвольно выбранной поверхности определить значения акустического поля в любой точке пространства. При этом, в ходе решения задачи, поверхность выбирается на расстоянии, где квадратичным членом в интеграле Коши-Лагранжа $P = \rho\frac{\partial\varphi}{\partial t} - \rho\frac{(\nabla\varphi)^2}{2}$ можно пренебречь, а значения потенциала и его производной в сжимаемой жидкости заменяются эквивалентными (с точностью до малых более высокого порядка) им значениями в несжимаемой жидкости. Из решения получается фиксация аэродинамического и акустического полей. Наибольшая интенсивность звукоизлучения перпендикулярна набегающему потоку.

Следует отметить, что дипольный характер излучения непосредственно следует из принимаемого предположения о периодическом срыве вихрей с границ тела, так как в этом случае возмущение гидродинамического поля в областях отрыва подобно полю колеблющегося в поперечном направлении тела.

Таким образом, возникающий дипольный звук целиком связан с таким «псевдоколеблющимся» телом.

Относительно же связи структурного строения вихревых образований и создаваемого ими акустического поля не делается никаких предположений. Поэтому возможности такого подхода сильно ограничены в смысле полноты решения, т.е. получения достаточно широкого спектра излучения звука за счет вихревых структур в следе за телом и на его границе.

Попытку связать звуковое поле с вихревыми структурами предпринял Пауэлл [5]. При этом он исходил из гипотезы о том, что в слабо сжимаемой среде все поле потока как гидродинамическое, так и акустическое генерируется завихренностью. Звук образуется за счет изменения площади или интенсивности вихревого кольца, эквивалентного изменению распределения фиктивных диполей по его площади. Изменение общей интенсивности этих фиктивных диполей генерирует дипольное акустическое поле с максимумом звука по нормали к плоскости кольца.

Согласно Пауэллу, в свободном потоке при отсутствии воздействия внешних сил возникает квадрупольное излучение в результате противоположного движения завихренностей относительно друг друга. Оба движения индуцируют дипольный звук, однако суммарная мгновенная интенсивность в силу неизменности общей интенсивности фиктивных диполей, объясняемой отсутствием внешнего воздействия в свободном потоке, будет равна нулю. Остается только квадрупольное излучение, равное сумме дипольных воздействий.

Теория Пауэлла позволяет объяснить дипольный характер излучения при обтекании тела с образованием дорожки Кармана и квадрупольный – в течениях с поперечным градиентом скоростей.

Недостатком теории Пауэлла является то, что в ней излучение относится не непосредственно к самим вихревым элементам, а к фиктивным диполям, размещенным в плоскости вихревого кольца или пары вихревых шнуров. Поэтому трудно применить эту теорию к отрывным течениям при достаточно больших числах Re, где количество вихревых элементов, образующих след, велико, и где характер течения, в частности турбулентного, непосредственно связан с самим вихревым элементом (например, частью вихревого кольца и т.д.) и с его внутренней структурой. Например, в случае плохо обтекаемого тела из анализа дорожки ближнего следа – зоны наибольшего излучения, можно, основываясь на представлении о фиктивных диполях, прийти к неверному выводу, что наибольшая интенсивность звука направлена по потоку, так как площади колец перпендикулярны к нему. На самом деле интенсивность излучения перпендикулярна потоку и зависит от состояния вихревого образования в каждой локальной области отрыва.

Подход Лайтхилла [4] к объяснению генерации шума аэродинамическим потоком состоял в написании полных уравнений потока сжимаемой жидкости в такой форме, при которой хорошо известный в акустике оператор записывался в левой части. Правая же часть представляет генерацию звука. В случае отсутствия источников, уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial^2\rho}{\partial t^2} - c_0^2\frac{\partial^2\rho}{\partial x_i^2} = -\frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \qquad (2)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - c_0^2\rho\delta_{ij}, \qquad (3)$$

где ρ – плотность; c_0 – скорость распространения возмущения; F – массовая сила на единицу объема; $\rho u_i u_j$ – тензор напряжений.

Тензор напряжений от сил давления и вязкости P_{ij} определяется по формуле [133]:

$$P_{ij} = p\delta_{ij} + \eta\left[-\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right], \quad (4)$$

где η – коэффициент обычной вязкости; δ_{ij} – символ Кронеккера.

Воздействие первого члена правой части эквивалентно дипольному и, как показывает уравнение, определяется полем массовых сил. В свободном потоке при отсутствии внешних периодических массовых сил дипольное излучение, согласно уравнению Лайтхилла, отсутствует. Второй член, в основном, характеризует изменение количества движения жидкости в самом общем случае. В частности, в него входит вклад от пульсационных составляющих турбулентного потока, иначе говоря от турбулентных (рейнольдсовых) напряжений, являющихся источником турбулентного шума [4, 24].

Соответствующее этому изменению излучение звука носит, согласно уравнению Лайтхилла, квадрупольный характер.

Задача об излучении звука флуктуирующим потоком сведена к задаче об излучении в классической стационарной акустической среде системой внешне приложенных напряжений T_{ij}. Из уравнений прямо вытекает, что любой участок флуктуирующего потока, в частности, произвольный участок следа сзади обтекаемого тела, является излучателем звука. Так как эти пульсационные, в частности, турбулентные напряжения при отсутствии массовых сил и источников возникают как результат взаимодействия вихревых структур с внешним потоком, то немедленно возникают вопросы: какова структура этих вихревых образований, каковы изменения этих структур при ламинарном и турбулентном гидродинамических взаимодействиях, и как все это связано с излучением звука?

Однако теория Лайтхилла, построенная целиком на континуальных представлениях, ничего не может сказать о связи гидродинамических структур и излучаемого ими звука.

Теории Лайтхилла и Пауэлла были бы в чем-то сходны, если бы можно было связать пульсационные напряжения T_{ij} с локальным изменением величины и положения завихренности, ответственной за создание этих напряжений, а также за образование гидродинамического и акустического полей. Однако эту связь трудно установить без введения новых гипотез, касающихся внутренней структуры гидродинамического вихря конечного диаметра, а также о существовании «скрытых» движений внутри этих вихрей и роли обычной вязкости при образовании таких движений.

Рибнер [6] предложил рассматривать объем излучения состоящим из маленьких ломтиков среды, ведущих себя подобно «пульсирующим баллончикам», меняющим свой объем и плотность – так называемых «дилатаций», комбинация из которых и составляет все пространство излучающее звук. С помощью такой модели ему удалось объяснить квадрупольный характер звучания в свободных потоках.

Джонсу [7] удалось показать, что в случае больших градиентов скоростей в среднем течении возникает добавка к квадрупольному излучению в виде так называемого «сдвигового шума», представляющего собой произведение градиента средней скорости на дипольный член. Сдвиговый шум отражает неравномерность пульсационного объема излучения. Он особенно эффективен при достаточно высоких значениях M<1.

В целом, можно констатировать, что теоретическое направление, основанное на работах Лайтхилла и других авторов в том виде, в котором оно сейчас существует, не дает возможности решать теоретически акустические задачи, связанные с движущимися (обтекаемыми) телами, для которых характерен дипольный характер излучения.

Это объясняется тем, что до сих пор не имеется еще достаточно ясного физического представления природы аэрогидродинамического звука и связанного с этим вида излучения (дипольного, квадрупольного и др.) в свободном потоке вне границ тела, без чего нельзя эффективно решать задачи интенсивности излучаемого звука, о характере спектра и т.д.

Введение в анализ дискретных вихревых структур, предложенное в работах И.Я.Хвощевского и В.А.Пухлия [8, 9], дает возможность по новому подойти к решению задач аэродинамики и аэродинамической акустики. На основе изменения внутреннего строения вихря при взаимодействии его с внешним изменяющимся аэродинамическим полем удалось не только дать представление о природе возникновения аэродинамического звука, но и определять в любом конкретном случае характер излучения (дипольный, квадрупольный и т.д.).

Обоснование структурного подхода к уравнениям движения в аэродинамике в аэродинамической акустике

Впервые уравнения движения были выведены Л.Эйлером [10] в предположении, что среда (жидкость, газ) является сплошной и невязкой, то есть уравнения, описывающие движение среды, не зависят от того, какова форма или структура составляющих ее частиц. При этом масса, скорость, а значит и количество движения жидкости и газа считаются непрерывно распределенными по объему. Силы взаимодействия между произвольным локальным объемом среды с внешним, окружающим его пространством движения направлены по нормали к поверхности, ограничивающей этот объем. Такую среду принято называть идеальной.

Однако такая модель жидкости или газа в применении к сопротивлению тел, к движению жидкости в каналах, трубах и т.д. давала несовместимые с действительностью результаты. В частности, вычисления сопротивления движущихся (обтекаемых) тел, а также перепады давления при движении жидкостей в каналах на основании этих уравнений приводили к нулевым значениям, что совершенно не соответствовало результатам опытов. Таким образом, модель движения среды нуждалась в дальнейшем приближении к реальности. Становилось все более и более ясным, что взаимодействие между элементами среды и внешним объемом движущейся жидкости происходит по направлению, отличающемуся от нормального, с присутствием касательных составляющих сил к поверхности элемента, то есть среда обладает свойством вязкости. На составление уравнений движения вязкой жидкости и были направлены усилия многих механиков XIX века [11].

Вначале искали решение на почве молекулярных представлений о строении вещества, то есть с точки зрения максимально возможного приближения механических абстракций к физической природе явления.

Навье, рассматривая в пространстве дискретное множество молекул, представляющих собою центры сил, величина которых весьма быстро падает с увеличением расстояния, и предполагая, что при движении происходит нарушение первоначального статического равновесия сил, связанных с равноудаленностью молекул друг от друга, приводящее к увеличению или уменьшению значений этих сил пропорциональное относительной скорости, вывел впервые в 1821 году уравнения движения жидкости с учетом «сцепления» молекул [12], то есть уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости.

Пуассон в 1829 году, исходя из того, что тела состоят из разрозненных молекул, отделенных друг от друга промежутками, лишенными весомой материи, как это имеет место в природе [13], то есть тоже с позиций молекулярной механики, но в остальном существенно иных, чем у Навье физических представлений, выводит уравнения движения вязкой сжимаемой жидкости. В своих рассуждениях Пуассон применяет схему взаимодействия, которая весьма близко напоминает недавние выводы Таунсенда [14] на основе экспериментальных исследований взаимодействия турбулентной области завихренности с внешним полем течения, сводящиеся к тому, что в начальный момент взаимодействия поля завихренности с внешним полем течение ведет себя как упругое твердое тело, а именно: считается, что взаимодействие между движущимися элементами среды как бы состоит из двух этапов – из «упругого, подобно в твердом теле, смещения» и «жидкостного выравнивания давлений». Эта схема теоретически больше никем не развивалась, хотя потенциальные возможности ее, как показывает опыт [14], весьма велики.

Однако, как вскоре выяснилось [15], уравнения движения вязкой жидкости можно получить и на основе континуальных представлений о движущейся среде без привлечения идей и методов молекулярной механики с использованием лишь нескольких физических гипотез: свойством изотропности среды, которая присуща большинству жидкостей и газов, имеющих округлые, близкие к сферическим, не вытянутые молекулы, линейностью соотношения между тензорами напряжений и скоростями деформаций, являющегося обобщением закона вязкого взаимодействия Ньютона [16] и, наконец, гипотезы об отсутствии вклада тензора напряжений в среднее нормальное напряжение.

Выводы уравнений движения вязкой жидкости на основе представлений о сплошности среды с использованием аналогичных гипотез были сделаны в 1843 году Сен-Венаном. И, наконец, в 1845 году Стокс на основе представлений молекулярной механики и независимо от них – с позиций сплошной среды, дал еще раз вывод уравнений движения вязкой жидкости, тем самым окончательно утвердив концептуальный подход к выводам и обоснованию этих уравнений [17], получивших в дальнейшем наименование уравнений Навье-Стокса.

Казалось бы, что с появлением этих уравнений многие важные проблемы аэрогидромеханики вскоре получат свое разрешение. Однако прошло уже более 150 лет, а многие насущные ее задачи все еще далеки от решения. Среди них весьма необходимая для практики проблема сопротивления тел, которая до сих пор даже в постановочной части не обрела должного осмысления, особенно в том пункте, где это касается аналитической связи границ тела с величинами их сопротивлений в случае отрывных обтеканий, разрешение которой открывало бы широкие перспективы для поиска различных аэродинамических тел минимального сопротивления в дозвуковой аэродинамике. А пока даже неясно, как приступить к решению таких задач на основе уравнений движения вязкой жидкости Навье-Стокса.

В последнее время взгляд на уравнения Навье-Стокса разделился. Одни ученые, например, американские авторы «Фейнмановских лекций по физике» [18], считают, что в уравнениях Навье-Стокса «все есть», но «нет еще способа это все вытащить». Другие ученые [19] утверждают, что как и уравнения идеальной жидкости Эйлера, так и уравнения Навье-Стокса, а также уравнения теории упругости, могут описывать только незакрученные движения и поля напряжений. Более полно этот тезис воплотился в рецензии профессора Л.Г.Корнейчука на вышедшую недавно монографию В.Г.Выскребцова «Гидро-механика в новом изложении» [19], который пишет: «…Автором также обнаружена неполнота уравнений Навье-Стокса в том смысле, что там не учитываются скручивание линий тока и, соответственно, вращательное движение жидкости».

Рядом ученых предпринимались попытки искусственно ввести в уравнения Навье-Стокса дополнительные члены, описывающие по мнению авторов, те или иные взаимодействия. Таковы, например, довольно искусственные соображения о вихревой вязкости [15], лишающие уравнения Навье-Стокса исходной строгости. В связи с этим вполне закономерен, особенно в задачах о сопротивлении тел при больших числах Re, вынужденный отход от уравнений движения вязкой жидкости и возврат к идеальной среде и решению задач с помощью гельмгольцевых поверхностей разрыва [20, 21], хотя этот метод достаточно ограничен и лишен перспективы решения различного рода вариационных задач при поиске тел оптимальных аэродинамических форм в дозвуковой аэродинамике.

Все это является достаточным основанием для поиска новой модели среды, которая более эффективно описывала, как с количественной, так и с качественной стороны движения реальных жидкостей и газов особенно при решении задач сопротивления различных плохо обтекаемых тел при относительно больших скоростях движения и других задач, связанных с взаимодействием областей завихренности с внешним полем. При этом необходимо, конечно, чтобы новая модель обладала бы свойством изотропности и была бы ньютоновской жидкостью, тогда в предельном случае перехода от нее к классической континуальной модели получились бы уравнения Навье-Стокса, то есть соблюдался бы так называемый «принцип соответствия», который является обязательным условием при обосновании нового подхода, удовлетворяющего условиям непротиворечивости по отношению к прежним теориям.

Решение будем искать путем синтеза дискретного и непрерывного. Опираясь на современные теоретические и экспериментальные исследования в гидродинамике турбулентных и ламинарных потоков, выявивших богатую вихревую структуру в тех и других видах течений, составляющих области завихренности [22, 23], попытаемся найти универсальную конструктивную форму, способную упорядочить эти вихревые структуры движения, как большие, так и малые, вплоть до бесконечно малых областей пространства движения, что позволило бы нам принять обычный аппарат дифференциального и интегрального исчисления и, в частности, дифференциальные уравнения, способные учесть особенности, связанные с этими вихревыми структурами. Напомним условия на эту конструктивную форму: она должна обеспечивать в дальнейшем в силу сферической симметрии свойство изотропности в локальной области пространства, содержащего структуры движения. В нашем случае это модель жидкой (газовой) природы.

Ее можно представить следующим образом: это пространство движения, представляющее собой континиуум, насыщение которого происходит за счет погружения в него бесконечного множества все более и более мелких сетей из структур завихренностей, составляющих в каждой из таких сетей дискретное множество таких структур.

Пространство, структурированное таким образом, независимо от размеров областей, составляющих его, включая области любой напе-ред заданной малой величины, будем

называть пространством дискретных вихревых структур. Такой дискретно-континуальный подход, связанный с представлением движения при непременном соблюдении условия хотя бы какой угодно малой сжимаемости среды, ведет к появлению новых свойств по сравнению с обычным связанным с чисто континуальным точечным подходом, применяемым в настоящее время к анализу движения [8, 9]. При этом принцип соответствия при сопоставлении старого и нового подходов выполняется, так как в предельном случае перехода к чистому континиуму без структурных составляющих новые уравнения движения автоматически переходят в уравнения Эйлера или Навье-Стокса. Конкретными примерами таких пространств могут быть пограничные слои на теле и вне его в области следа, отдельные вихревые трубки, в общем случае, искривленные в трехмерном пространстве течения.

Структурный подход к уравнениям движения в аэрогидромеханике и аэродинамической акустике

Вначале, исходя из конкретной задачи, устанавливается картина аэродинамического поля на уровне образующих его структур, ламинарных или турбулентных (например, пограничного слоя ближнего или дальнего следов при обтекании тела [2]).

Затем выявляется строение аэродинамических элементов или их совокупностей, составляющих эти структуры, далее каждому такому элементу или совокупности соотносится акустический излучатель, и, в конце концов, проводится гидродинамический и акустический анализ с целью выявления дальнего и ближнего акустических полей, включая псевдозвук.

Необходимо подчеркнуть, что, несмотря на присутствие границ внутри потока, например, твердого тела, все аэродинамические, а следовательно и акустические элементы принадлежат жидкости, и этот факт имеет общий характер, несмотря на то, колеблется граница или нет.

Аналогичное последнему утверждению можно найти у Пауэлла [5].

Таким образом, проблема решения задач аэрогидродинамической акустики на современном этапе упирается в поиски теоретических моделей, описывающих гидродинамику и акустику явлений на уровне структур, так сказать, «закономерно построенных молей», тесно взаимосвязанных с образующимися вне их гидродинамическими и акустическими полями.

Существующие к настоящему времени полуэмпирические теории струй и следов не решают этой задачи, так как в силу отсутствия в них закономерностей связи областей струи и следа с граничными условиями и внешним аэродинамическим полем трудно представить эти области через истинные вихревые структуры. В противном случае последние осуществляли бы эту связь и ход решения был бы иным.

Следует указать на появившиеся в последнее время теоретические работы [26, 27] по нестационарным вихревым следам сзади плохообтекаемого тела.

Они основаны на представлении следа в виде пары бесконечно тонких гельмгольцевых вихревых поверхностей. Сбегая с границ тела и периодически колеблясь поперек потока, особенно в начальном участке, они, вообще говоря, моделируют вихревое излучение в следе за телом.

Однако, структура вихревых элементов таких следов на основании этих работ не может быть выявлена из-за бесконечно малой толщины принятой в исследовании вихревой поверхности.

Поэтому остается необъяснимым «сплошной» звуковой спектр, связанный с излучением каждого элемента следа, не говоря уже о таких более тонких вещах, как квадрупольное излучение турбулентной областью следа и т.д.

В настоящем разделе рассматриваются аэрогидродинамические и связанные с ними акустические модели следов и струй, отвечающие достаточно большим числам Рейнольдса, когда среду (газ, жидкость) можно считать маловязкой (рис.1).

Учет тонкой структуры следа или струи на уровне простейших элементов позволяет рассмотреть вклад в акустическое поле каждой небольшой областью следа или струи, т.е. представить спектр излучения, близкий к непрерывному, что и наблюдается в экспериментах.

Будем принимать во всех рассматриваемых случаях следующие допущения: жидкость маловязкая, слабо сжимаемая, течение плоское ($M << 1$), так что жидкость в ближней области можно считать несжимаемой [2]. Впрочем, с точки зрения структур, ничего существенного не изменяется и при $M<1$.

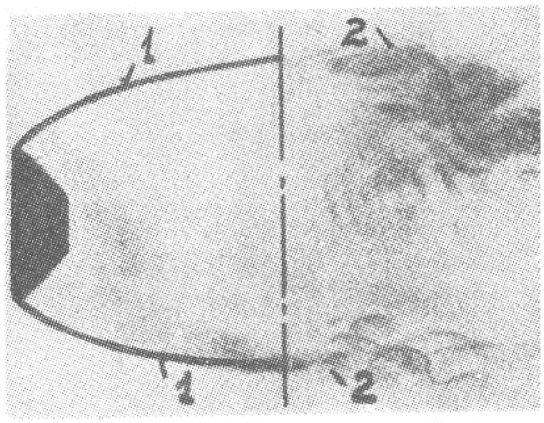

Рис.1. Обтекание пластинки плоским потоком при Re = 900 [28].

Рассматриваемые ниже модели являются дальнейшим развитием теоретической картины следа сзади плохо обтекаемого тела, так называемой активной вихревой дорожки, состоящей из вихрей конечного диаметра, имеющих внутреннюю структуру, именуемых вихрями-решетками. В случае турбулентного обтекания – это так называемые «энергосодержащие» вихри, испытывающие наибольшие пульсации в поперечном направлении и вносящие наибольший вклад в кинетическую энергию турбулентности в зоне ближнего следа.

Экспериментальное подтверждение этому можно найти в работе [29].

Модель вихря-решетки одинаково годится как для активных, так и для гельмгольцевых вихревых рядов. Экспериментальные данные по исследованию зоны ближнего следа [25, 30] показывают, что часть свободно-вихревых слоев остается ламинарной вплоть до наступления кризисного состояния, когда весь след становится турбулентным.

При этом, как показывают визуальные наблюдения [28], не происходит разрывов и перемешивания этих слоев с находящейся вне их жидкостью (рис.1). Это явление характерно для гельмгольцевых вихревых слоев, где каждый его элемент имеет скорость жидкости в данном месте.

Напротив, для активных вихревых слоев дорожки существенным фактором является пронзаемость их струйками тока и связанный с этим поперечный перенос импульса, что характерно для турбулентного состояния.

В этом принципиальное отличие двух видов вихревых слоев. На рис.2 представлены локальные картины сечения, связанные с гельмгольцевым и активным вихревым слоем.

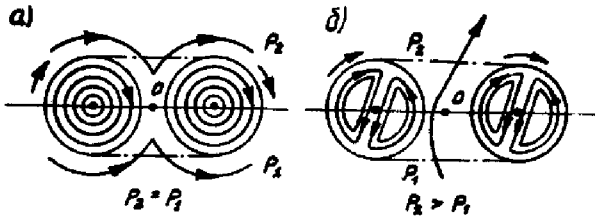

Рис.2. Характер течения в локальной системе координат, движущейся совместно с центром 0: а) вихревой ряд Гельмгольца (модель ламинарной части вихревого слоя); б) активный вихревой ряд (модель «энергонесущих» вихрей в турбулентной части вихревого слоя, P_1, P_2 – давления на внутренней и внешней границах ряда, соответственно).

Важной особенностью, показанной в работах Н.Е.Жуковского [31] и А.Я.Миловича [32], является введение стационарного двойника осциллирующей активной вихревой дорожки. Здесь необходимо сделать следующее замечание. Обтекание всех тел, исходя из характера изменения формы ближнего следа, можно разделить на два вида: существенно нестационарные, связанные с периодическим отрывом крупных вихрей в зоне ближнего следа (тела с острыми кромками, цилиндрические тела в докризисном режиме обтекания и т.д.), и обтекание, близкое к стационарному, когда форма ближнего следа не претерпевает больших изменений (закритический режим обтекания тел, полутела на поверхности и т.д.).

Граница образующегося при обтекании «жидкого тела», определяемая пограничными и свободновихревыми слоями, в каждый момент времени может быть подсчитана из уравнений их завихренности, составленных в интегральной форме, если исходить из представлений пограничного слоя и внешних свободных вихревых слоев, как комбинации гельмгольцевых поверх-ностей и активных вихревых поверхностей Жуковского-Миловича. Место стыковки между ними может быть истолковано, как зона перехода ламинарного слоя в турбулентный. С точки зрения структуры «жидких элементов», определяющих акустическое поле, существенной разницы между первым и вторым видом обтекания нет. Поэтому использование стационарного представления или, конкретнее, стационарного двойника колеблющейся дорожки, позволяет моделировать как с гидродинамической, так и с акустической стороны, не только отрывные течения, близкие стационарным, но и существенно нестационарные, если разумно провести осреднение [32]. При этом

ламинарные и турбулентные области отрыва определяются соответственно стационарными двойниками поверхностей Гельмгольца [21] и Жуковского-Миловича.

Будем использовать при анализе форм отрыва стационарный двойник вихревого следа. Опыты показывают [33, 34], что позади тела на некотором расстоянии от него может происходить схлопывание вихревых слоев, образующих ближний след. На рис.3 приведена расчетная схема ближнего следа в случае симметричного обтекания тонкого тела с острой кромкой. Составляющими свободновихревых слоев в приведенной схеме являются вихри-решетки.

Форма этих замкнутых вихревых слоев AOBYLANKMB, ограничивающих жидкое тело Ω пониженного давления, в случае представления их вихревыми поверхностями, удовлетворяет следующим соотношениям:

$$\frac{1}{2\pi}\left\{\cos\beta\left[\int\limits_{BMK}\gamma\frac{y'-y}{(x-x')^2+(y'-y)^2}ds-\right.\right.$$

$$-\int\limits_{ANK}\gamma\frac{y'+y}{(x-x')^2+(y'+y)^2}ds\Bigg]+$$

$$+\sin\beta\left[\int\limits_{BMK}\gamma\frac{x-x'}{(x-x')^2+(y'-y)^2}ds-\right.$$

$$\left.\left.-\int\limits_{ANK}\gamma\frac{x-x'}{(x-x')^2+(y'+y)^2}ds\right]\right\}+u_\infty^n=0, \qquad (5)$$

где $\gamma = \gamma(s)$ – плотность вихревого слоя; BMK, ANK – поверхности Жуковского-Миловича. Остальные обозначения смотри на рис.3.

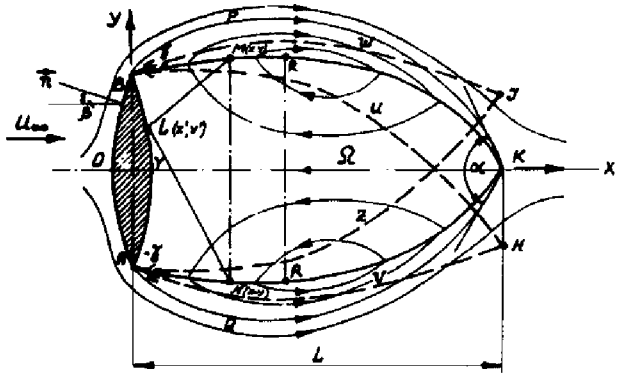

Рис.3. Расчетная схема обтекания пластинки с отрывом: BMK и ANK – зоны свободного турбулентного (активного) вихревого следа; области $B_\omega J_z A$ и $B_u H_v A$ – верхние и нижние положения ближнего следа соответственно.

Как видно из соотношения (5), для тонких тел $\left(\frac{OY}{AB}<<1\right)$, перпендикулярных к потоку, в интегральный член, определяющий нормальную составляющую скорости, не входит воздействие от пограничных слоев, а только от активного свободновихревого слоя. Условие касательного схода с кромок тела набегающих внешних к пограничному слою струек (условие Кутта-Жуковского) запишется следующим образом:

$$\varphi=\frac{\pi}{2}$$

где φ – угол между касательной к передней границе тела и вихревой поверхностью в месте отрыва.

В случае представления свободновихревых слоев вихрями-решетками конечного диаметра условия (5) примут вид системы p уравнений вида:

$$\frac{1}{2\pi}\left\{\cos\beta\left[\sum_{BNK}^{N}\gamma_n\frac{y_i-y_n}{(x_n-x_i)^2+(y_i-y_n)^2}-\right.\right.$$

$$-\sum_{ANK}^{N}\gamma_n\frac{y_i+y_n}{(x_n-x_i)^2+(y_i+y_n)^2}\Bigg]+$$

$$+\sin\beta\left[\sum_{BMK}^{N}\gamma_n\frac{x_n-x_i}{(x_n-x_i)^2+(y_i-y_n)^2}-\right.$$

$$\left.\left.-\sum_{ANK}^{N}\frac{x_n-x_i}{(x_n-x_i)^2+(y_i+y_n)^2}\right]\right\}+u_\infty^n=0, \qquad (7)$$

где x_n, y_n – координаты центра вихря; x_i, y_i – координаты точки на границе тела i = 1, 2,…, p.

Условие Чаплыгина-Жуковского примет вид:

$$0<\varphi<\frac{\pi}{2}, \qquad (8)$$

где BMK, ANK – линии центров вихрей-решеток.

Следует отметить, что для активных свободновихревых слоев не требуется соблюдения конечности скорости на кромках тела, т.е. в случае бесконечно тонких поверхностей Жуковского-Миловича касательные скорости в точках схода могут принимать бесконечные значения. Важно, чтобы не было излома соприкасающейся с пограничным слоем внешней линии тока в этих точках. Именно в таком смысле понимаются условия Кутта-Жуковского.

На основе экспериментальных данных можно отметить утолщение свободных вихревых слоев ближнего следа от начала к

середине и утоньшение их при приближении к концу. Это позволяет сформулировать условия изменения абсолютной величины завихренности по длине вихревых рядов следа. Она является монотонно возрастающей до определенного сечения R – R, затем монотонно убывающей до точки смыкания вихревых рядов, т.е. на любом отрезке вихревого и нижнего вихревого ряда слева и справа от сечения R – R (рис.3), при условии следования $p \to q \to R\left(|pR| > |qR|\right)$:

$$|\gamma_p| < |\gamma_q| < |\gamma_R|. \qquad (9)$$

Если расчетная форма ближнего следа известна, то по ней нетрудно найти силу гидродинамического сопротивления тела по распределению давления на его границах или близкое к ней значение R по следующей формуле:

$$R = \rho u_0^2 B - \alpha, \qquad (10)$$

где ρ – плотность среды, u_0 – касательная составляющая скорости на внешней границе вихревого слоя в начале дорожки; B – максимальная ширина дорожки, $\alpha << \rho u_0^2 B$ или в случае бесконечно тонких вихревых рядов величина более высокого порядка малости.

Кроме того, с помощью найденной активной дорожки нетрудно установить кинематику движения и, самое главное, кинематическую картину расчетной области ближнего следа. Примерно до сечения $x = \frac{1}{2} x_B$, где x_B – абсцисса максимального сечения следа, границы этой области почти не меняются при переходе к осциллирующему вихревому следу. Тем самым с большой степенью точности определяется линия (или струйка) тока, ограничивающая область турбулентности.

К сожалению, формул (5) или (7) и заданных дополнительных условий (6) или (8) недостаточно для определения формы ближнего следа. Задачу не прояснит и задание угла смыкания следа α.

Очевидно в первом приближении используя экспериментальные данные [33, 34], а также решенные задачи по обтеканию каверн [20, 21] последовательными шагами можно приблизиться к достаточно «хорошему» решению.

В частности, для пластинки, перпендикулярной к набегающему потоку, это нетрудно сделать.

Однако есть другой путь теоретически точного подсчета кинематических и динамических величин.

Он основан на представлении отрыва в виде бесконечного следа, образующегося сзади обтекаемого тела и состоящего из активных поверхностей Жуковского-Миловича.

Кинематическая и динамическая картина в непосредственной близости к телу мало чем отличается (особенно для закритических режимов обтекания тел с плавным профилем) от полученной с помощью точного решения для конечного ближнего следа.

Образно говоря, форма полубесконечной активной отрывной зоны представляет собой как бы вытянутую переднюю часть (часть вытекания из внутренней области вихревого отрыва) ближнего следа.

Рассмотрим дорожку ближнего следа, свободную от какого-либо закрепления. Жидкость примем какой угодно малой вязкости. Однако прежде чем перейти к анализу движения этой дорожки, необходимо договориться относительно системы координат. Будем рассматривать не одну систему координат, локально связанную с центром между двумя вихрями, а множество систем координат, идентификация между которыми в определенно выбранном для рассмотрения сечении определена с точностью до смещения на расстоянии между двумя ближайшими к этому сечению вихрями. Тогда в определенном месте рассматривается как бы все время один и тот же вихрь через моменты времени Δt:

$$\Delta t = \frac{b}{u} - \alpha; \qquad \alpha << \frac{b}{u}, \qquad (11)$$

где b – расстояние между межвихревым центром в исследуемом сечении и ближайшим к нему со стороны тела; u – конвективная скорость межвихревого центра в исследуемом сечении.

Рассматривая картины движения в промежуточном времени $\Delta\tau << \Delta t$, начальными моментами которых являются t, $t + \Delta t$, $t + 2\Delta t, \ldots$, $t + n\Delta t$, мы анализируем в любой принятой нами системе координат (например, в локальной) весь цикл движения вихря. Будем называть принятую систему координат обобщенной.

Вернемся к анализу движения.

Пусть имеется дорожка ближнего следа, охватывающая область пониженного давления, которую внешний поток стремится сплющить. Не ограничивая общности исследования, рассмотрим движение области вихревого ряда

дорожки, близкой к телу, начиная с момента, когда под действием импульса давления со стороны внешнего потока происходит деформация вихрей-решеток и движение их поперек потока вниз (рассмотрение ведем в локальной обобщенной системе координат). Деформационная волна завихренности в результате воздействия обычной вязкости, какой бы малой величины она не была, порождает, при сохранении общей интенсивности вихря-решетки, неоднородность в распределении элементарных вихорьков внутри целого вихря, в связи с чем изменяется характер течения, определяемый в каждый момент времени по закону Био-Савара:

$$\vec{w} = \frac{1}{2\pi}\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_j}{r_j^2}(\vec{n}\times\vec{r}), \qquad (12)$$

где $\vec{w}$ – вектор скорости в исследуемой точке; γ_j – циркуляция вихорька в вихре-решетке; $\vec{n}$ – вектор циркуляции; $\vec{r}$ – радиус-вектор от исследуемой точки до центра вихорька в вихре-решетке; N – число вихорьков в вихре-решетке; L – число вихрей-решеток.

Возникновение неоднородности внутри вихря-решетки эквивалентно наложению на симметричную его структуру двух квазивихрей противоположного вращения (рис.2). Воздействие этого вихревого диполя на внешнее поле течения выразится в увеличении скорости истечения струек через внешнюю границу вихревого ряда и связанного с этим через интеграл Коши-Лагранжа [35] уменьшения давления с внешней его стороны. В дальнейшем движении вниз давление струйки с внешней стороны становится все меньше и меньше, в результате чего возникает квазивихревой диполь противоположной ориентации, гасящий предыдущий до полного их исчезновения и возникновения начальной ситуации, но только со стороны нижней границы вихрей-решеток.

В дальнейшем движение определяется давлением изнутри и противоположно ориентированными диполями и происходит вверх по сечению до начального верхнего положения. Количество вытекающей жидкости существенно уменьшается.

На рис.4 приведен график изменения средних по сечению струйки величин скоростей и давлений для струек, протекающих через межвихревое пространство за полный цикл колебаний T области вихревого ряда.

На рис.4 обозначено: $\bar{u}$, $\bar{v}$ – горизонтальная и вертикальная составляющие скоростей в сечениях *аа* и *вв* вихревого ряда за полный цикл; $\bar{u}'$, $\bar{v}'$ – пульсационные составляющие скоростей.

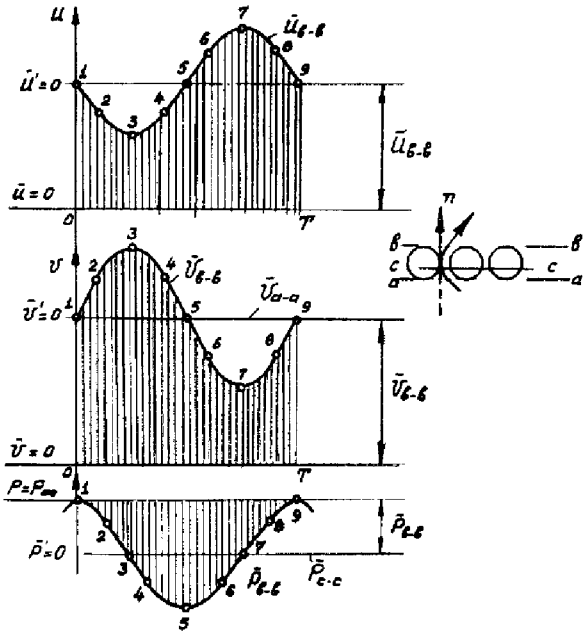

Рис.4. Изменения средних по сечению струйки величин скоростей и давлений.

Если $\{u,\ v,\ p\} = a$, то:

$$\bar{a} = \frac{1}{L}\int_L a dl; \qquad \tilde{\bar{a}} = \frac{1}{T}\frac{1}{L}\int_T\int_L a dl dt.$$

Таким образом, рассмотренная область вихревой дорожки за счет колебаний, связанных с периодически изменяющимся градиентом давления между внешней и внутренней областями и сопутствующих этому изменению «скрытых движений» внутри вихрей-решеток, устойчиво сохраняется за все время обтекания. Действительно, колебания вихревого ряда вблизи точки отрыва определяются не только переменным градиентом давления, но и формой набегающего потока, граничными условиями и условиями неразрывности, в результате которых поперечное отклонение вихревого ряда в одну сторону в начальном полуцикле колебания должно быть полностью скомпенсировано отклонением в обратную сторону в последующем полуцикле. В противном случае, нетрудно показать, что в результате накопления разности отклонений должен произойти поворот ближнего следа навстречу набегающему потоку, что конечно невозможно.

Аналогичный анализ любой другой области дорожки приведет к тем же выводам.

Выводы

Проведен анализ современного состояния аэрогидродинамической акустики, из которого следует, что звук аэрогидродинамического происхождения и до настоящего времени наименее исследован.

Рассмотрены структурные модели обтекания тел и модель струйного истечения, составляющими элементами которых являются вихревые образования.

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

Список литературы

1. Юдин Е.Я. О вихревом шуме вращающихся стержней. – ЖТФ, 1944, №9, 24-37.
2. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. – М.-Л.: Гостехиздат. 1946. – 234 с.
3. Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound turbulent. – Proc. Roy. Soc. (London), ser A, Y231, 1955, p.505-514.
4. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. – Proc. Roy. Soc.(London), A, 267, №1329, 1962, p.147-182.
5. Powell A. Theory of vortex sound. – JASA, 36, №1, 1964, p.177-195.
6. Ribner H.S. The Generation of sound by turbulent jets. – Advance Appl. Mech., vol.8, 1964, p.103-182.
7. Jones I.S.F. Aerodynamic noise dependent on mean shear. – J. Fluid Mech., vol.33, 1968, p.17-30.
8. Пухлий В.А., Хвощевский И.Я. Исследования физических явлений при аэродинамической шумообразовании. – Тезисы доклада на семинаре «Акустика турбулентных потоков». Звенигород, 1980. – М.: Изд-во Акустического института АН СССР, 1980, 17-19.
9. Пухлий В.А., Хвощевский И.Я. Структурный подход к уравнениям движения сплошных сред. – В кн.: Математическое моделирование: нелинейные проблемы и вычислительная математика. – Звенигород, 1990. – М.: Изд-во АН СССР, 1990, с.58-63.
10. Euler L. Principes generaux du movomont des fluids. – Hist de l`Acad. Berlin, vol.11, 1755, p.270-286.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 848 с.
12. Navier L. Memoire sur les lois du movement des fluids. – Memoires de l`Academie des sciences, vol.6, 1827, p.389-440.
13. Poisson S.D. Memoire sur les equations generales de l`equilibre et du movement des cops solides elastiques et des fluids. – Journal de l`Ecole Polytechnique, t XIII, Cahier 20, 1831, p.1-174.
14. Townsend A.A. The mechanism of entrainment in free turbulent flow. – J. of Fluid Mechanics, 1966, 1966, vol.26, Part 4, p.689-715.
15. Ламб Г. Гидродинамика. Пер. с 6-го англ. изд. – М.: Гостехтеоролит, 1947. – 928 с.
16. Саткевич А.А. Теоретические основы гидроаэромеханики. – М.: ИКТП, 1934. – 312 с.
17. Stokes G.G. On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion and of the Equilibrium and Motion of elastic Solids. – Trans. Of the Cambridge Philosophical Society, vol.8, 1845, p.287-319.
18. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс Н. Фейнмановские лекции по физике. Том 7, Физика сплошных сред. – М., 1966.
19. Выскребцов В.Г. Гидромеханика в новом изложении. – М.: Изд-во «Спутник», 2001. – 261 с.
20. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 284 с.
21. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. – М.: Физматгиз, 1961. – 496 с.
22. Колмогоров А.М. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. – ДАН СССР, том 30, №4, 1941, с.299-303.
23. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизмы и теория. – М.: Физматгиз, 1963. – 342 с.
24. Миниович И.Я., Перник А.Д., Перовский В.С. гидродинамические источники звука. – Л.: Судостроение, 1972. – 480 с.
25. Рошко А., Фишдон У. О роли перехода в ближнем следе. – Механика. Периодический сборник переводов иностранных статей. – М.: Мир, 1969, №6, с.50-58.
26. Постоловский С.Н. К расчету отрывного обтекания тел плоским потоком идеальной несжимаемой жидкости. – Труды ЦКТИ, вып.10. – М.: Мир, 1969, №6, с.50-58.
27. Постоловский С.Н., Ильичев К.П. Расчет нестационарного отрывного обтекания тел плоским потоком невязкой жидкости. – Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, №2, 1972, с.171-190.
28. Flachsbart. Zeitschrift für angewandte Mathematik and Mechanik, Band 15, 1935, p.32-37.
29. Фидман Б.А. Поле скоростей в водном потоке при внезапном увеличении глубины. - Известия АН СССР, МЖГ, №4, 1963, с.512-522.
30. Goldstein S. Modern development in fluid dynamics. – Vol.1-2. – New-York, Dover, 1965. – 372 p.
31. Жуковский Н.Е. Вихревая теория гребного винта. – Полное собрание сочинений, том 6. – М.-Л.: Гостехиздат, 1937, 1937. – 346 с.
32. Милович А.Я. Теория динамического взаимодействия тел и жидкости. – М.: Госиздат лит-ры по строительству, 1955. – 311 с.

33. Исатаев С.Н. Экспериментальное исследование турбулентного движения жидкости в следе за плохо обтекаемым телом. – Ученые записки Казахского Рос. Ун-та. Математика, механика и физика, том 30, вып.5. – Алма-Ата, 1957, с.70-78.
34. Вулис Л.А., Исатаев С.Н. Турбулентное движение несжимаемой жидкости в следе за плохо обтекаемым телом. – В ан.: Исследования физических основ рабочего процесса топок. – Алма-Ата, 1957, с.41-49.
35. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 2. – М.: Наука, 1970. – 442 с.

References

1. Yudin E.J. About vortical noise of rotating cores. - JTF, 1944, №9, 24-37.
2. Blohinzev D.I. Acoustics of the non-uniform moving environment.--l M.:Gostehizdat. 1946. - 234 p.
3. Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound turbulent. – Proc. Roy. Soc. (London), ser A, Y231, 1955, p.505-514.
4. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. – Proc. Roy. Soc.(London), A, 267, №1329, 1962, p.147-182.
5. Powell A. Theory of vortex sound. – JASA, 36, №1, 1964, p.177-195.
6. Ribner H.S. The Generation of sound by turbulent jets. – Advance Appl. Mech., vol.8, 1964, p.103-182.
7. Jones I.S.F. Aerodynamic noise dependent on mean shear. – J. Fluid Mech., vol.33, 1968, p.17-30.
8. Pukhliy V. A, Hvoshchevsky I.J. Research of the physical phenomena at aerodynamic to form of noise. - Report Theses at a seminar «Acoustics of turbulent streams». Zvenigorod, 1980. - M: Publishing house of Acoustic institute AS of the USSR, 1980, p.17-19.
9. Pukhliy V. A, Hvoshchevsky I.J. Structural the approach to the equations of movement of continuous environments. - in book : Mathematical modelling: nonlinear problems and calculus mathematics. - Zvenigorod, 1990. - M: Publishing house AS of the USSR, 1990, p.58-63.
10. Euler L. Principes generaux du movomont des fluids. – Hist de l`Acad. Berlin, vol.11, 1755, p.270-286.
11. Lojtsjansky Л.Г. Mechanics of a liquid and gas. - M: Publishing house "Science", 1973. - 848 p.
12. Navier L. Memoire sur les lois du movement des fluids. – Memoires de l`Academie des sciences, vol.6, 1827, p.389-440.
13. Poisson S.D. Memoire sur les equations generales de l`equilibre et du movement des cops solides elastiques et des fluids. – Journal de l`Ecole Polytechnique, t XIII, Cahier 20, 1831, p.1-174.
14. Townsend A.A. The mechanism of entrainment in free turbulent flow. – J. of Fluid Mechanics, 1966, 1966, vol.26, Part 4, p.689-715.
15. Lamb G. Gidrodinamika. The lane with 6th English publ. - M: Gostehtheorlit, 1947. - 928 p.
16. Satkevich A.A. Theoretical of a hydroaeromechanics basis. - M: IKTP, 1934. - 312 p.
17. Stokes G.G. On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion and of the Equilibrium and Motion of elastic Solids. – Trans. Of the Cambridge Philosophical Society, vol.8, 1845, p.287-319.
18. Fejnman R., Leyton P, Sends N. Fejnmanovskie of lecture on physics. Volume 7, Physics of continuous environments. - M, 1966.
19. Viskrebzov V.G. Gidromehanika in a new statement. - M: Publishing house "Companion", 2001. - 261 p.
20. Birkgof G., Sarantonello E. Strui, traces and cavities. The lane with English - M: the World, 1964. - 284 p.
21. Gurevich M. I. The theory of streams of an ideal liquid. - M: Fizmatgis, 1961. - 496 p.
22. Kolmogorov A.M. Local turbulence structure in an incompressible viscous liquid at Reynolds's very big numbers. – RAS USSR, volume 30, №4, 1941, p.299-303 is given the USSR.
23. Hinze I.O. Turbulence, its mechanisms and the theory. - M: Fizmatgiz, 1963. - 342 p.
24. Miniovech I.J., Pernik A.Д., Perovsky V.S. Hydrodynamic sources of a sound. - L: Shipbuilding, 1972. - 480 p.
25. 25.Roshko A., Fishdon U. About a transition role in a near trace. - Mechanics. The periodic collection of transfers of foreign articles. - M: the World, 1969, №6, p.50-58.
26. Postolovsky C.H. To calculation fragmented flows of bodies a flat stream of an ideal incompressible liquid. - Works CKTI, rel.10. - M: the World, 1969, №6, p.50-58.
27. Postolovskij S.N., Ilyichev K.P. Calculation nonstationary fragmented flows of bodies a flat stream of a nonviscous liquid. – Bull. AS the USSR, Mechanics of a liquid and gas, №2, 1972, p.171-190.
28. Flachsbart. Zeitschrift für angewandte Mathematik and Mechanik, Band 15, 1935, p.32-37.
29. Fidman B.A. Field of speeds in a water stream at sudden increase in depth. - News AS the USSR, MLG, №4, 1963, p.512-522.
30. Goldstein S. Modern development in fluid dynamics. – Vol.1-2. – New-York, Dover, 1965. – 372 p.
31. Zhukovsky N.E. Vortical the theory of the rowing screw. - The full collected works, volume 6.-l M.: Gostehizdat, 1937, 1937. - 346 p.
32. Milovich A.J. Theory of dynamic interaction of bodies and a liquid. - M: the State publishing house of lits-ry on building, 1955. - 311 p.
33. Isataev S.N. Experimental research of turbulent movement of a liquid in a trace behind badly streamline body. - Scientific notes Kazakh Grew. Mathematics, mechanics and physics, volume 30, rel.5. - Alma-Ata, 1957, p.70-78.

34. Vulis L.A., Isataev S.N. Turbulent movement of an incompressible liquid in a trace behind badly streamline body. - in book: Researches of physical bases of working process of fire chambers. - Alma-Ata, 1957, p.41-49.
35. Sedov L.I. Mechanics of the continuous environment. Volume 2. - M: Science, 1970. - 442 p.

УДК 621.325

Исследования рабочих характеристик влагомера нефти и нефтепродуктов на основе СВЧ метода измерений

И. Б. Широков [1], И. И. Марончук [2]

[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, shirokov@ieee.org*

[2]*ООО «Генезис-Таврида», ул.Щербака, 5, г.Севастополь, 299011, Россия, igimar@mail.ru*

Статья поступила 22.11.2018 г.; после доработки 26.11.2018 г.

Аннотация

В работе показана необходимость создания однородных эмульсий для получения точных, воспроизводимых результатов исследований влагосодержания нефтепродуктов. Авторами разработан и собран экспериментальный стенд, центральным звеном которого являлся изготовленный экспериментальный образец измерителя содержания воды в нефтепродуктах. Стенд представлял собой замкнутый гидравлический контур, содержащий четыре зоны. Проведены экспериментальные исследования на двух типах нефтепродуктов, подтвердившие разработанные ранее теоретические положения. Предложен способ определения содержания воды в эмульсии содержащей заранее неизвестный тип нефтепродукта. Разработаны мероприятия по автоматизированному учету и минимизации влияния дестабилизирующих факторов на процесс измерений.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, влагосодержание, СВЧ метод, микроволновые колебания, стенд, гидравлический контур.

Performance studies of the moisture meter of oil and petroleum products based on the microwave measurement method

I. B. Shirokov [1], I. I. Maronchuk [2]

[1] *FSAEE HE "Sevastopol State University," Universitetskaya St., 33, Sevastopol 299053, Russia, shirokov@ieee.org*

[2] *Genesis-Tavrida Ltd., Scherbak St., 5, Sevastopol, 299011, Russia, igimar@mail.ru*

Received 22.11.2018 г.; received in final form 26.11.2018 y.

Abstract

The work shows the need of manufacture of homogeneous emulsions to obtain accurate, reproducible results of moisture content studies of petroleum products. The authors have developed and assembled an experimental stand, the central element of which is a manufactured experimental sample of a water content meter in petroleum products. The stand is a closed hydraulic circuit containing four zones. Experimental studies were implemented on two types of petroleum products, which confirmed the theoretical concepts developed earlier. A method for determining the water content in an emulsion containing a previously unknown type of oil product is proposed. The мероприятия for automated accounting and minimizing the effect of destabilizing factors on the measurement process were developed.

Keywords: oil, oil products, moisture content, microwave method, microwave oscillations, stand, hydraulic circuit

Введение

Известно, что адекватное определение количества влагосодержания в нефти и нефтепродуктов, а также экологический контроль содержания нефтепродуктов в воде, является весьма актуальной задачей [1, 2]. Несмотря на огромное количество присутствующих на рынке современных влагомеров нефти и нефтепродуктов, используемых для различных целей и работающих в широком диапазоне определения влагосодержания, обработанные с их помощью данные не всегда являются реальными и пригодными для получения достоверной информации о со-

держании воды в исследуемом продукте. При этом выпускаемые промышленностью приборы достаточно сложны в изготовлении и эксплуатации и, как следствие, дороги [2].

В рамках проводимых авторами работ разрабатывается принципиально новый прибор для измерения содержания воды в нефтепродуктах. Разработка прибора базируется на гомодинном методе получения полезной измерительной информации [3, 4]. Данный метод характеризуется известной простотой технической реализации и обладает, к тому же, повышенными метрологическими характеристиками [4, 5].

Проведена разработка и изготовление узлов и блоков экспериментального образца микроволнового измерителя содержания воды в нефтепродуктах [6, 7].

Целью данной стадии работы является проведение экспериментальных (натурных) исследований по изучению влияния дестабилизирующих факторов на точность измерения содержания воды в нефтепродуктах. Для решения этой задачи авторами разработан и изготовлен экспериментальный стенд, центральным звеном которого является разработанный и изготовленный экспериментальный образец измерителя содержания воды в нефтепродуктах.

Оборудование и методы проведения эксперимента

С целью проведения натурных исследований влагосодержания в нефти и нефтепродуктах в широком диапазоне концентраций (по наличию содержания воды до 30% вес.) и температур (от 20 до 80°С) при испытании разработанного и изготовленного опытного образца поточного влагомера нефти и нефтепродуктов на основе СВЧ метода измерений был разработан и собран опытный испытательный стенд, принципиальная схема которого показана на рис. 1, внешний вид которого показан на рис. 2.

Конструктивно стенд выполнен в виде замкнутого гидравлического контура (ГК), обеспечивающего постоянную циркуляцию водонефтяной эмульсии с целью усреднения ее состава. При этом гидравлический контур выполнен из трубопровода круглого сечения, а его сварные соединения сделаны в таком варианте, чтобы избежать возможностей наличия застойных зон в ГК, которые могут отрицательно сказаться на исследованиях, приводя к процессам расслаивания нефти с водой и таким образом, сказываясь на точности приготовления водонефтяных эмульсий разных концентраций.

ГК стенда размещен на несущей раме, представляющей собой сварную прямоугольную конструкцию, выполненную из металлического прямоугольного профиля, в вертикальном варианте.

Это связано с тем, чтобы не допустить наличие воздуха в ГК, который так же может негативно сказаться на точности испытаний влагомера при проводимых исследованиях.

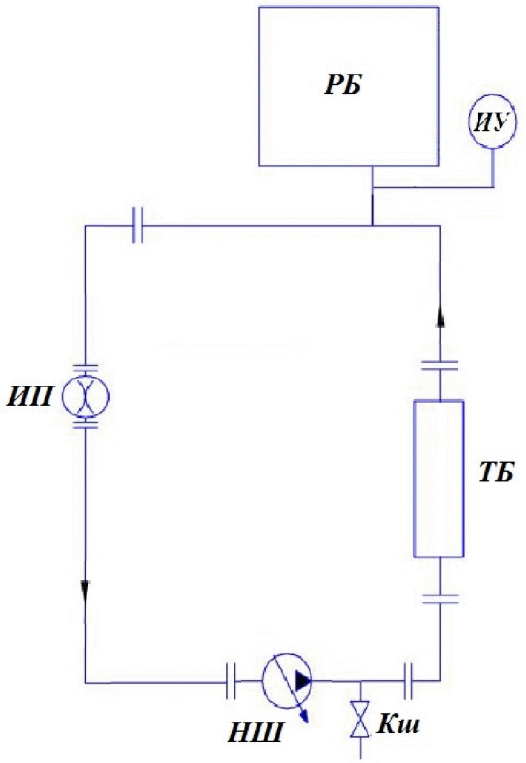

Рис. 1. Принципиальная схема испытательного стенда для исследований характеристик СВЧ влагомера нефти и нефтепродуктов: РБ – расширительный бак; ИУ – измерительное устройство; ИП – испытуемый прибор; ТБ – блок температурной регуляции (термостатирования); НШ – шестеренчатый насос; Кш – кран шаровой.

Рабочая зона стенда выполнена из нержавеющей стали, которая плохо смачивается водонефтяной эмульсией, что препятствует налипанию компонентов исследуемой смеси на рабочие поверхности ГК.

Известно, что производители поточных влагомеров гарантируют точность и стабильность функционирования своих приборов при условии прохождения испытуемой эмульсии через них с расходом от 2 до 25 $м^3$/ч [2, 8]. В связи с этим, выбраны размеры элементов конструкций трубопроводов таким образом, чтобы пропускная способность разработанного ГК стенда соответствовала этим данным. Кроме того, с целью под-

держания необходимого расхода были рассмотрены несколько видов жидкостных насосов, после чего было решено использовать шестеренчатый насос с внутренним зацеплением, основными преимуществами таких насосов являются: компактность, высокий КПД, возможность прокачки малых объемов жидкостей, возможность работы как с малыми, так и с большими давлениями. Кроме того, в связи с особенностями конструкции и основами работы он способствует созданию необходимых водонефтяных смесей, и их контролируемое движение по ГК.

Рис. 2. Испытательный стенд для исследований характеристик СВЧ влагомера нефти и нефтепродуктов.

Условно ГК стенда можно разбить на четыре зоны: первая - загрузки, смешения и дозирования исследуемых смесей; вторая - исследования рабочих характеристик влагомера; третья - диспергирования и слива рабочих смесей; четвертая — создания необходимых температурных режимов и термостатирования рабочей смеси.

Увеличение диаметра рабочего трубопровода в первой и второй зонах вызвано необходимостью сброса избыточного давления, возникающего в трубопроводе ГК в участке расположенном после шестеренчатого насоса в связи с не герметичностью гидравлического контура в первой зоне.

Зона загрузки, смешения и дозирования исследуемых компонентов (верхняя часть стенда) состоит из трубопровода диаметром 100 мм с вваренным в него сверху расширительным баком вместимостью 10 литров и узлом дозирования исследуемых компонентов.

Заполнение ГК основной рабочей жидкостью и дозирование компонентов для создания смеси нужного состава производится через этот узел. Нагнетания жидкости в бак производится в ручном режиме. Рядом с расширительным баком в трубопроводе сделан отвод для крепления параллельно с ним кварцевой трубки, имеющей разметку, показывающую уровень заполнения исследуемой смесью ГК.

Вторая зона ГК по направлению движения эмульсии представляет собой блок для монтажа испытуемого влагомера, крепление которого осуществляется с помощью фланцевых соединений.

Причем, как видно из рис. 2, нижняя часть зоны имеет коническое сужение, переходя на трубу меньшего диаметра (35 мм), переходящую в следующую зону — диспергирования.

В зоне диспергирования и слива рабочих смесей расположен шестеренчатый насос марки НМШФ 2-40-1.6/4Б-13 с электродвигателем мощностью 1,1 кВт и максимальными 1450об/мин, которые обеспечивают перемешивание компонентов с целью создания стабильной водонефтяной эмульсии.

Электродвигатель управляется с помощью частотного преобразователя, который позволяет регулировать обороты в широком диапазоне, проводя исследования при фиксированных расходах от 1,0 до 25,0 $м^3$/ч, достигая необходимой равномерности водонефтяной смеси в контуре. Для слива и замены отработанной водонефтяной смеси или с целью ее частичного слива для добавления воды в контур, а так же для слива промывочной жидкости в нижней части ГК рядом с насосом имеется сливной вентиль.

Четвертая зона контура, так же как и третья, имеет диаметр трубопровода 35 мм, и включает в себя ряд устройств, обеспечивающих при исследовании смеси поддержание заданной температуры.

В верхней части расположена муфельная печь резистивного нагрева, нихромовый нагреватель которой через слюдяную изоляцию плотно облегает трубопровод на длине в 300 мм. Управление нагревателем осуществляется с помощью прецизионного терморегулятора ТРМ-500М производства фирмы «ОВЕН» по закону ПИД регулирования с использованием для кон-

троля температуры на рабочей смеси термопары типа ТХА. Для сокращения временного фактора при термостатировании рабочей эмульсии нижняя часть четвертой зоны снабжена холодильной системой на основе полупроводниковых термоэлектрических модулей. Холодильная система включает в себя алюминиевые радиаторы, выточенные под трубопровод, на которые через пасту ТПМ-8 помещены два термоэлектрических модуля Пельтье марки ТВ-127-1.4-1.15 (40х40мм, 8А, 80Вт) производства ОАО «Криотерм», сверху на которые с использованием пасты ТПМ-8 прикреплены массивные решетчатые алюминиевые радиаторы для отвода тепла. Система позволяет проводить исследования на эмульсиях, термостатированных от 20 до 80°С с поддержанием температуры ±0,5°С.

Основные параметры разработанного и изготовленного испытательного стенда приведены в таблице 1.

Таблица 1. *Основные характеристики испытательного стенда*

Наименование параметра	Значение параметра
Рабочая температура эмульсии, °С	20÷80
Погрешность в поддержании температуры эмульсии, °С	±0,5
Диапазон концентраций эмульсии по наличию содержания воды, %	до 30
Диапазон объемного расхода эмульсии, $м^3/ч$	1÷25

Результаты исследований

Исследования по измерению содержания воды в нефтепродуктах проводились на двух типах продуктов: трансформаторное масло Т-1500 и отработанное моторное масло неизвестного типа. Диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла известна и равна 2. Диэлектрическая проницаемость отработанного моторного масла заранее была неизвестна, предполагалось, что она может изменяться в пределах от 2 до 5.

Сначала в ГК установки заливалось трансформаторное масло Т-1500 до нижнего уровня, индицируемого с помощью прозрачной кварцевой трубки.

Затем последовательно при постоянном перемешивании и циркуляции в ГК добавлялась вода дозированного объема. При этом предпринимались меры по стабилизации температуры эмульсии. После каждого добавления воды фиксировались показания индикаторного устройства, располагавшегося на рабочем столе рядом с ГК (см. рис. 2).

Была снята зависимость показаний индикаторного устройства в некоторых условных единицах от содержания воды в смеси с трансформаторным маслом Т-1500, выраженная в процентах. Зависимость показана на рис. 3, нижняя кривая (красного цвета).

Ход кривой, как и ожидалось, был монотонно нарастающим с очевидным убыванием скорости нарастания показаний индикаторного устройства с ростом содержания воды в эмульсии. Высокая скорость изменения показаний прибора на начальном участке обусловлена большой разницей в диэлектрических проницаемостей масла ($\varepsilon = 2$) и воды ($\varepsilon = 80$) при температуре +20°С в лабораторных условиях. По мере добавления воды относительный рост диэлектрической проницаемости смеси снижался, что отражалось на ходе кривой.

С помощью программы Advanced Grapher был проведен регрессионный анализ кривой и получена полиноминальная функция, описывающая данную кривую и представленная следующей формулой

$$y = -0,0202819 \cdot x^2 + 1,7454094 \cdot x + 21,8518018,$$

где x — процентное содержание воды в эмульсии. При этом максимальное относительное отклонение показаний индикаторного устройства от указанной полиноминальной функции не превышало 0,1%.

Главная идея заключается в том, что нет никакого резона пытаться понять физический смысл указанной полиноминальной функции. Решение заключается в том, что в памяти компьютера, который будет ключевым звеном в будущем опытном образце измерителя, запоминаются указанные коэффициенты полиноминальной функции и далее тем же компьютером по показаниям первичного преобразователя производятся простейшие математические вычисления и определяется процентное содержание воды в эмульсии с высокой точностью. Причем мощность компьютера не должна быть высокой. Объема памяти и производительности современных микроконтроллеров достаточно для хранения данных и производства всех необходимых вычислений. Вопрос заключается лишь в том, чтобы занести в память компьютера весь массив калибровочных коэффициентов для всех возможных типов нефтепродуктов, с которыми будет работать измеритель.

В дальнейшем планируется разработка алгоритма, позволяющего конечному пользовате-

лю самостоятельно заносить в память компьютера необходимые коэффициенты по экспериментально снятым зависимостям.

Далее, в ходе экспериментальных исследований в ГК испытательного стенда было залито отработанное моторное масло неизвестного типа. Также была снята зависимость показаний индикаторного устройства (выходных данных первичного микроволнового преобразователя) от содержания воды в эмульсии и построена зависимость, показанная на рис. 3, верхняя кривая (зеленого цвета).

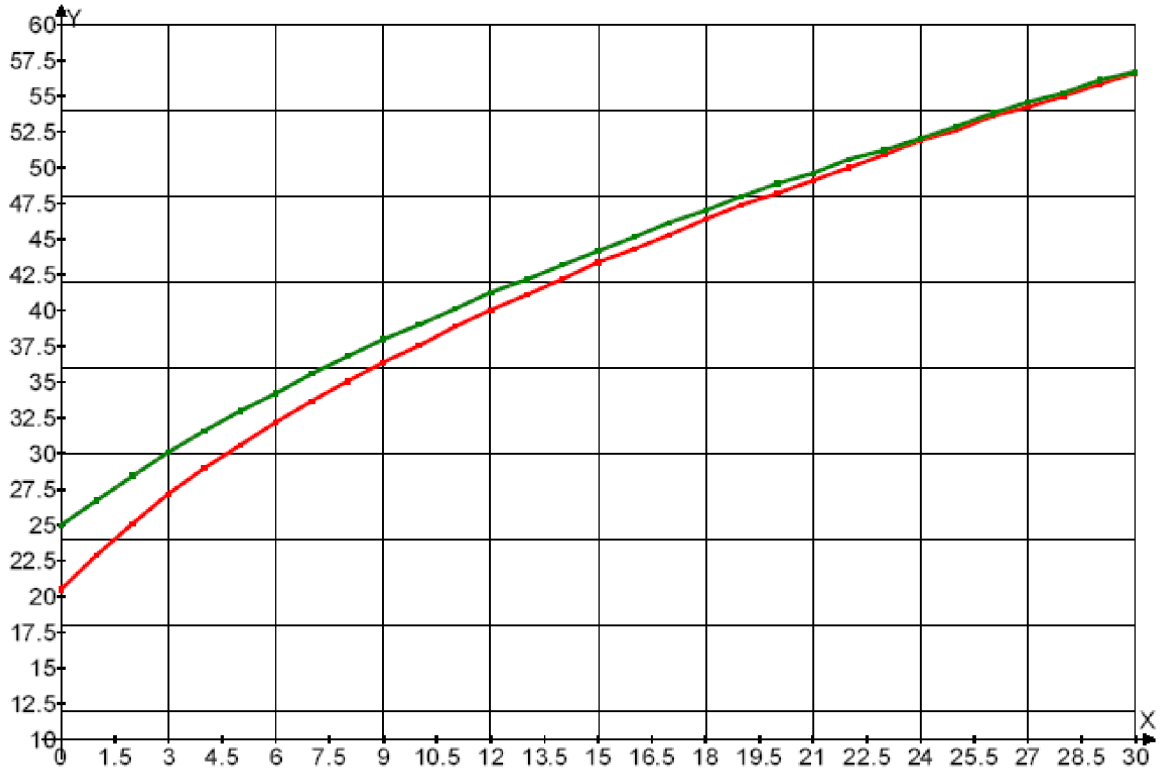

Рис. 3. Зависимость показаний устройства индикации от содержания воды в смеси

Очевидно, что диэлектрическая проницаемость данного нефтепродукта выше, чем у трансформаторного масла, но ход кривой оказался аналогичным, изменились только лишь коэффициенты полиноминальной функции и стали такими, как указано в следующем выражении

$$y = -0,0144809 \cdot x^2 + 1,4557554 \cdot x + 25,7226258 .$$

Задача пользователя заключается лишь в том, чтобы сделать правильный выбор типа нефтепродукта, заранее описанного и документированного в памяти компьютера для адекватного оценивания содержания в нем воды.

Разработан способ определения содержания воды в эмульсии притом, что тип нефтепродукта заранее неизвестен [9]. Для реализации данного способа в тракт первичного преобразователя помимо канала фазовых измерений вводят канал амплитудных измерений, по сигналам в которых оценивают грубо содержание воды в эмульсии. Данные этих показаний служат лишь для выбора кривой, наиболее близко описывающей тестируемую смесь воды с нефтепродуктом.

Основные измерения при этом осуществляются фазовым методом. Задача пользователя заключается лишь в том, чтобы заполнить память компьютера необходимым семейством кривых, расположенных достаточно близко друг от друга.

Степень близости кривых определяется требуемой погрешностью определения основного информационного параметра — содержание воды в продукте.

При этом пользователь не озадачивается выбором типа нефтепродукта, это делает за него компьютер, заодно компьютер показывает на индикаторе предполагаемый тип используемого нефтепродукта.

Однако необходимо отметить, что на стадии проектирования первичного преобразователя (начальный этап работы [4]) возможные технические решения, обеспечивающие реализацию данного способа в полном объеме, не закладывались.

В результате амплитудный канал измерений в рамках этих исследований в требуемом динамическом диапазоне реализовать не удалось. При дальнейшем развитии данной работы этот момент будет принят во внимание и будут реализованы необходимые технические решения.

Далее была исследована зависимость показаний прибора от температуры смеси. Для исследований было взято трансформаторное масло Т-1500 с 10-процентным содержанием в нем воды. Температурная зависимость показана на рис. 4.

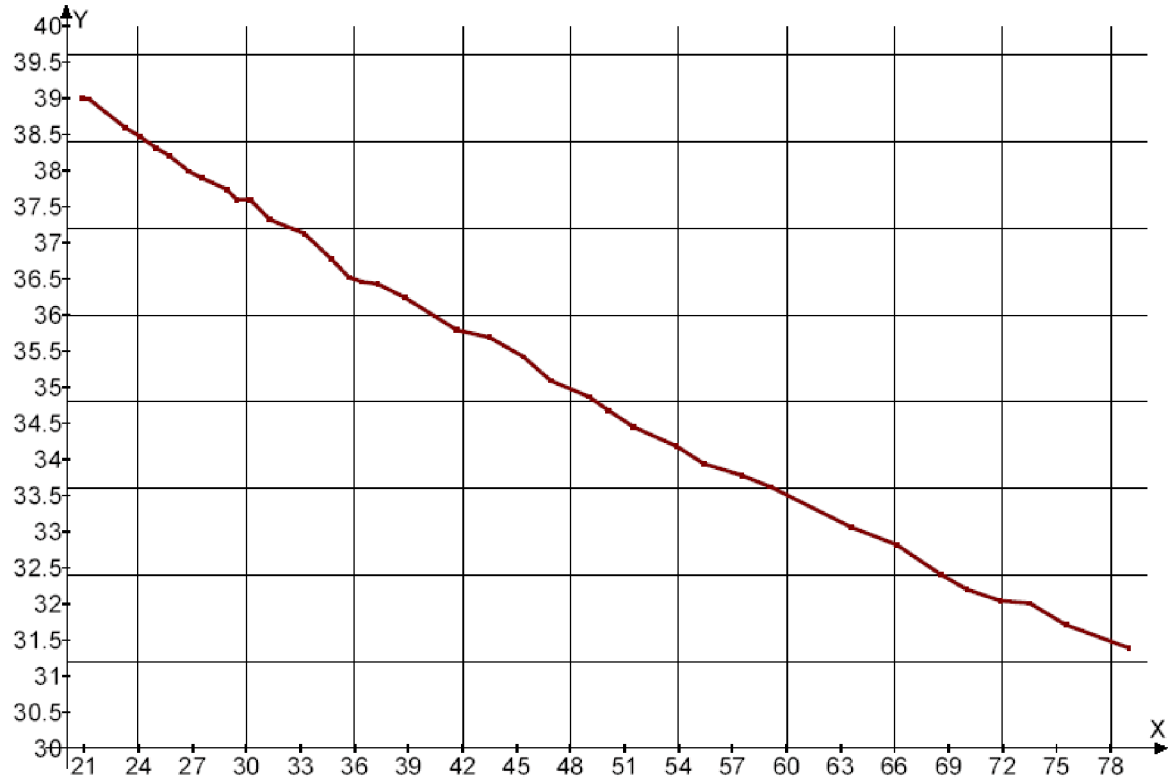

Рис. 4. Зависимость показаний устройства индикации от температуры смеси.

Поведение данной кривой предсказуемо. Как и ранее, данную кривую можно описать следующей полиноминальной функцией

$$y = 5{,}6860654 \cdot 10^{-4} x^2 - 0{,}1877155 \cdot x + 42{,}6585206 .$$

В данном выражении первым членом можно пренебречь ввиду малости его коэффициента, в результате чего получается простая линейная функция зависимости показаний от температуры.

Совершенно очевидно, что при производстве измерений необходимо принимать во внимание температуру смеси и вводить в результаты измерений соответствующие поправки. Эту операцию, как и ранее, осуществляет встроенный в измеритель компьютер.

Заключение

Показано, что для получения точных, воспроизводимых результатов исследований необходимо, чтоб исследуемая смесь нефтепродукт-вода находилась в виде однородной эмульсии. Для этого собрана экспериментальная установка (стенд) для изучения и исследования влияния дестабилизирующих факторов на точностные показатели разрабатываемого СВЧ прибора. Стенд представляет собой замкнутый гидравлический контур, содержащий 4 зоны: загрузки, смешения и дозирования исследуемых смесей; исследования рабочих характеристик влагомера; диспергирования и слива рабочих смесей; создания необходимых температурных режимов и термостатирования рабочей смеси.

Проведены экспериментальные исследования на двух типах продуктов; трансформаторное масло Т-1500 и отработанное моторное масло неизвестного типа. Исследования подтвердили разработанные ранее (в предыдущих работах) теоретические положения.

В результате проведенной работы предложен способ определения содержания воды в эмульсии притом, что тип нефтепродукта заранее неизвестен.

Разработаны мероприятия по автоматизированному учету и минимизации влияния де-

стабилизирующих факторов на процесс адекватного и воспроизводимого определения влагосодержания в нефти и нефтепродуктах.

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. Широков И.Б. Приборы, применяемые для определения содержания воды в нефти и нефтепродуктах (обзор) / И.Б. Широков, И.И. Марончук // Энергетические установки и технологии. — 2018. — Т. 4. — № 1. — С. 56-73.
3. Пат. 2594338 РФ МПК G01N 22/00 (2013.01), G01F 13/00 Способ определения процентного содержания воды в смеси диэлектрик-вода при изменении содержания воды в смеси в широких пределах / Широков И. Б. Патентообладатель: Широков И. Б. №2016114471/93; заявл. 13.04.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. №22. —8 с.
4. Широков И.Б. Разработка СВЧ метода высокоточного измерения процентного содержания воды в водонефтяной смеси / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии. — 2018. — Т.4. — №2. — С.115-120.
5. Широков И.Б. Микроволновый измеритель содержания воды в нефтепродуктах / И.Б. Широков, И.И. Марончук, И.В. Сердюк // Матер. 28-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Севастополь, Крым, Россия, 9—15 сентября 2018. — С. 1369–1374.
6. Широков И.Б. Разработка элементов конструкций измерителя влаги в нефти и нефтепродуктах на основе СВЧ метода / И.Б. Широков, Н.И. Черкашина, И.И. Марончук // Энергетические установки и технологии. — 2018. — Т.4. — № 2. — С.121-130.
7. Широков И.Б. Разработка электронных блоков микроволнового измерителя содержания воды в нефти и нефтепродуктах / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии.— 2018. — Т.4. — №3. — С. 35-44.
8. Немиров, М. С. Обзор поверочных установок и стендов, используемых при поверке поточных влагомеров нефти / М.С. Немиров, Т.Г. Силкина, Р.Р. Ибрагимов // Материалы научно-практической конференции "Автоматизация и метрология в нефтегазовом комплексе". - Уфа, 2012. - С. 69-71.
9. Заявка на изобретение № 2018133066/93, РФ, МПК G01N 22/00 (2013.01), G01F 13/00 (2013.01) Способ определения процентного содержания воды в смеси диэлектрик-вода при использовании различных диэлектриков / Широков И.Б., Марончук И.И. Заявлено 17.09.2018.

References

1. Shirokov I.B. Methods for determination of water content in oil and oil products, residual oil content in water / I.I. Marunchuk, I.B. Shirokov // Energy Installations and Technologies. — 2017. — T. 3. — No. 4. — P. 130—145.
2. Shirokov I.B. Instruments used to determine the water content in oil and petroleum products (review) / I.B. Shirokov, I.I. Maronchuk // Energy Installations and Technologies. — 2018. — T. 4. — No. 1. — P. 56—73.
3. Pat. 2594338 Russian Federation IPC G01N 22/00 (2013.01), G01F 13/00 A method for determining the percentage of water in a mixture of dielectric—trick—water when the water content in the mixture varies over a wide range / Shirokov I.B. The patent holder: Shirokov I. B. № 2016114471/93; claimed. 13/04/2016; publ. August 10, 2016, Bul. №22.— 8p.
4. Shirokov I.B. Development of the microwave method of high—precision measurement of the percentage of water in the water—oil mixture / I.I. Maronchuk, I.B. Shirokov // Energy Installations and Technologies. — 2018. — T.4. — No. 2. — P.115—120.
5. Shirokov I.B. Microwave water content meter for oil products / I.B. Shirokov, I.I. Maronchuk, I.V. Serdyuk // Mater. 28th Intern. conf. «Microwave Technology and Telecommunication Technologies» (CriMiCo'2018). Sevastopol, Crimea, Russia, September 9–15, 2018. — P. 1369–1374.
6. Shirokov I.B. Development of the elements of moisture meter design in oil and oil products based on the microwave method / I.B. Shirokov, N.I. Cherkashina, I.I. Maronchuk // Energy Installations and Technologies — 2018. — T.4. — No. 2. — P.121—130.
7. Shirokov I.B. Development of electronic components of a microwave measuring instrument for water content in oil and oil products / I.I. Maronchuk, I.B. Shirokov // Energy Installations and Technologies.— 2018. — T.4. — No 3. — P. 35-44.
8. Nemirov, MS. Review of calibration equipment and test benches used in the calibration of in-line hydrometers of oil. Nemirov, T.G. Silkina, R.R. Ibragimov // Materials of the scientific-practical conference "Automation and Metrology in the Oil and Gas Complex". — Ufa, 2012. — P. 69-71.
9. Patent Application No. 2018133066/93, Russian Federation IPC G01N 22/00 (2013.01), G01F 13/00 (2013.01) Method for determining the percentage of water in a dielectric-water mixture using different dielectrics / Shirokov I.B., Maronchuk I.I., claimed 09/17/2018.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.31

Математическая модель оптимизации режима работы энергосистемы республики Крым и г. Севастополя

С.В. Вологдин[1], В.В. Гурьев[2], Б.А. Якимович[3], В.В. Кувшинов[4]

ФГАОУ ВО «Ижевский государственный технический университет» имени М.Т. Калашникова, профессор кафедры «Информационные системы» г. Ижевск, 426000, РФ, E-mail: [1] Vologdin_sv@mail.ru
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» Институт ядерной энергии и промышленности», кафедра «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» г.Севастополь, 299015, РФ, E-mail: [2] guryevvv@tavrida.so-ups.ruu , [3]yakimovich52@gmail.com, [4]kuvshinov.vladimir@gmail.com[4]

Аннотация

Влияние вырабатываемой мощности солнечных электростанций на режимы работы энергосистемы. Усовершенствование методов управления и оптимизации выработки генерирующей мощности возобновляемых источников электроэнергии. Разработка методики оптимизации выработки солнечных электростанций оказывающей влияние на надежность и качество электроснабжения.

Ключевые слова: математическая модель, прогнозирование, оптимизация режимов работы энергосистем, характеристики энергосистемы, повышение надежности энергосистемы, возобновляемая энергетика.

Mathematical model of optimization of operation mode energy systems of the republic of Crimea and g. Sevastopol

C.V. Vologdin[1], V.V. Guryev[2], B.A. Yakimovich[3], V.V. Kuvshinov[4].

Izhevsk State Technical University, named after M.T. Kalashnikova, Professor, Department of Information Systems, City of Izhevsk, 426000, RF, E-mail: [1]Vologdin_sv@mail.ru
Sevastopol State University Institute of Nuclear Energy and Industry, Department Renewable energy sources and electrical systems and networks. City of Sevastopol, 299015, RF,
E-mail: [2]guryevvv@tavrida.so-ups.ru, [3] yakimovich52@gmail.com, [4]kuvshinov.vladimir@gmail.com

Annotation

The influence of the generated power of solar power plants on the operating modes of the power system. Improvement of management methods and optimization of generation of generating capacity of renewable energy sources. Development of methods for optimizing the production of solar power plants affecting the reliability and quality of power supply.

Keywords: mathematical model, forecasting, optimization of operating modes of power systems, characteristics of the power system, improving the reliability of the power system, renewable energy.

Введение

Бесперебойное обеспечение электроэнергией территории Крыма является стратегически важной задачей развития региона. С фактическим присоединением Крыма к России снизилась надёжность систем электроснабжения из-за энергетической зависимости Крыма от Украины

[1]. Для повышения энергонадежности Крыма на полуострове вводятся новые генерирующие мощности, в частности Таврическая и Балаклавская ТЭС с установленной проектной мощностью по 470 МВт каждая.

В настоящее время производителей электрической энергии региона можно разбить на следующие основные группы:

1. ТЭЦ тепловые электроцентрали;
2. МГТЭС мобильные газотурбинные электрические станции;
3. ВИЭ возобновляемые источники электроэнергии, в т.ч. СЭС (солнечные электростанции) и ВЭС (ветровые электростанции);
4. РИСЭ резервные источники электроснабжения;
5. ЭНЕРГОМОСТ (кабельно-воздушные линии (далее – КВЛ) электропередач и подстанции, построенные для подключения энергосистемы Крыма к ЕЭС России (ОЭС Юга)).

Структурная схема энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя приведена на рис. 1.

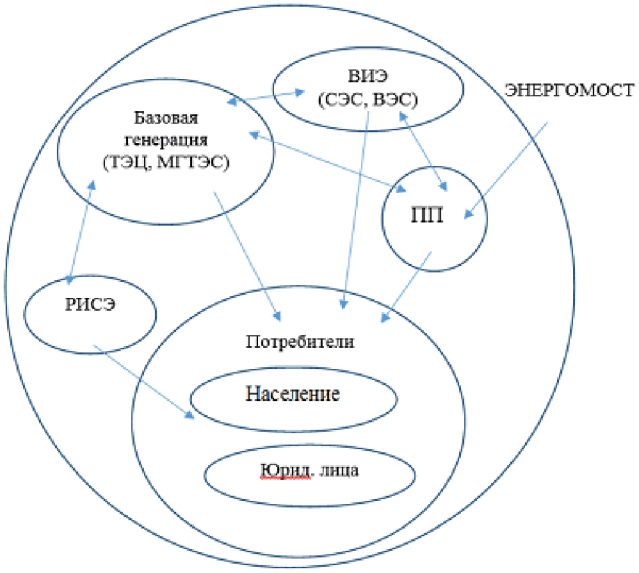

Рис. 1. Структура энергосистемы Крыма.

В таблице 1 представлены установленная мощность первичных производителей электроэнергии Крыма. Суммарная мощность тепловых электростанций составляет 306 МВт (с учетом Таврической и Балаклавской ТЭС – 1246,34 МВт), мобильных газотурбинных электрических станций – 396,1 МВт, возобновляемых источников электроэнергии – 388,5 МВт, мощность резервных источников – 121 МВт.

Необходимо заметить, что в летний период вырабатываемая мощность СЭС, при неблагоприятных природных условиях, может снижается почти на 90%, в то время как существенная часть генерирующих мощностей тепловых электростанций находится в плановых ремонтах.

Суммарный максимально-допустимый переток (далее – МДП) энергомоста составляет 810 МВт [2].

Таблица 1. *Основные производители электроэнергии в Крыму [3-6]*

Производители	Установленная мощность, МВт
Симферопольская ТЭЦ	86
Севастопольская ТЭЦ	34,5
Камыш-Бурунская ТЭЦ	30
Сакская ТЭЦ (ПГУ-120)	117,44
ТЭЦ (ПАО «СЗ»)	20,4
ТЭЦ «Титановые инвестиции»	18
Таврическая ТЭС*	470
Балаклавская ТЭС*	470
Итого ТЭЦ	**306,34 (1246,34)****
Симферопольская МГТЭС	135
Севастопольская МГТЭС	129,3
Западно-Крымская МГТЭС	131,8
Итого МГТЭС	**396,1**
СЭС Перово	106
СЭС Охотниково	83
СЭС Николаевка	70
СЭС Митяево	32
СЭС Родниковое	8
Ветровые СЭС	88
Итого ВИЭ	**387**
Итого РИСЭ	**121**
ИТОГО	**2150,44**

* - строящиеся ТЭС

**- без учета и с учетом новых мощностей Таврической и Балаклавской ТЭС

Математическая модель оптимизации

Ставится задача по оптимизации энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя с целью снижения затрат на производство и передачу электроэнергии с учетом повышения надежности энергоснабжения и повышения экологического состояния региона.

Исходные данные в задаче являются динамическими величинами, что позволяет получать решение (требуемая мощность различных производителей электроэнергии) в различные периоды времени в зависимости от нужд потребителей.

В этом случае целевая функция представляет собой минимум затрат на производство и передачу энергии:

$$c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 + c_6x_6 \to \min \quad (1)$$

В данной постановке задачи на первоначальном этапе не осуществлялась разбивка потребителей на группы населения и юридических лиц, что будет учтено в дальнейших исследованиях. Все коэффициенты и переменные являются динамическими величинами и изменяются в течении времени

Система ограничений имеет вид:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 >= N_{потр}, \quad (2)$$

$$x_1 <= x_{1max}, \quad (3а)$$

$$x_2 <= x_{2max}, \quad (3б)$$

$$x_3 <= x_{3max}, \quad (3в)$$

$$x_4 <= x_{4max}, \quad (3г)$$

$$x_5 <= x_{5max}. \quad (3д)$$

В целевой функции (1) и системе ограничений (2,3) приняты следующие обозначения: $N_{потр}$ – максимальное потребление энергосистемы (МВт), мощности производителей электроэнергии (МВт): x_1, x_{1max} – фактическая и максимальная мощность ТЭЦ; x_2, x_{2max} – фактическая и максимальная мощность; x_3, x_{3max} – фактическая и максимальная мощность ВИЭ; x_4, x_{4max} – фактическая и максимальная мощность РИСЭ; x_5, x_{5max} – фактическая и максимальная мощность ЭНЕРГОМОСТ; x_6 – дефицит мощности необходим для выполнения условия (2). Тарифы (условные единицы за МВт энергии): c_1 – тариф на производство и передачу энергии от ТЭЦ; c_2 – тариф на производство и передачу энергии от МГТЭС; c_3 – тариф на производство и передачу энергии от ВИЭ; c_4 – тариф на производство и передачу энергии от РИСЭ; c_5 – тариф на производство и передачу энергии от ЭНЕРГОМОСТ; c_6 – штрафной тариф от дефицита мощности (заведомо большая величина).

Тарифы в предлагаемой постановке задачи могут быть двух типов в зависимости от целей расчетов:

1. осреднённые фактические значения в данный период времени по данным энергоснабжающих организаций (цель расчетов – снижение затрат на производство и транспортировку электроэнергии);
2. условные качественные оценки – «штрафы» (цель – повышение надежности системы и обеспечение бесперебойного питания потребителей в целом), т.е. чем меньше величина тарифа (штрафа) ci тем для энергосистемы данный i -ый источник более качественно предпочтительный и наоборот.

Для решения задачи оптимизации энергосистемы использовался симплекс-метод [7]. Если в результате решения данной задачи (1) - (3) дефицит мощности $x_6 > 0$ значит, существует дефицит мощности в размере x_6, если $x_6=0$ – дефицит мощности отсутствует.

Расчет различных сценариев энергообеспечения

В вычислительном эксперименте в качестве тарифов задавались качественные оценки – «штрафы» (см. табл. 2), где минимальный тариф принят для возобновляемых источников энергии как самых экологичных и перспективных источников.

Таблица 2. *Качественные оценки тарифов*

Вид тарифа	Величина тарифа, усл. ед. /МВт
Тариф на производство и передачу энергии от ТЭЦ (c_1)	2
Тариф на производство и передачу энергии от МГТЭС (c_2)	4
Тариф на производство и передачу энергии от ВИЭ (c_3)	1
Тариф на производство и передачу энергии от РИСЭ (c_4)	5
Тариф на производство и передачу энергии от ЭНЕРГОМОСТ (c_5)	3
Штрафной тариф от дефицита мощности (c_6)	10

В случае наличия резерва мощности ($x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 >= N_{потр}$) – $x_6=0$ (например, расчет по условию №1 и №2), распределение мощности производителей определяется тарифами при минимизации целевой функции (1).

С учетом того, что в 2017 г. в Крыму были достигнуты многолетние максимумы энергопотребления: 1427 МВт – зимний максимум и 1249 МВт – летний максимум [2] предлагаются следующие расчетные сценарии с учетом роста пиковых нагрузок потребления (до 10 % в 2019 году) от достигнутых в 2017 г.:

1. Межсезонье. Ремонты ТЭЦ и МГТЭС. Минимальная солнечная активность. Нагрузка потребления 1250 МВт. Без учета строящихся Балаклавской ТЭС и Таврической ТЭС.
2. Летний период. Максимальная солнечная активность. Пиковое потребление - 1374 МВт. Без учета строящихся Балаклавской ТЭС и Таврической ТЭС.

3. Зимний период. Минимальная солнечная активность. Пиковое потребление - 1570 МВт. Без учета строящихся Балаклавской ТЭС и Таврической ТЭС.
4. Максимальная солнечная активность. Пиковое потребление - 1570 МВт. Максимальная мощность МГТЭС, ТЭЦ и ТЭС.
5. Максимальная солнечная активность. Невысокая нагрузка потребления - 1000 МВт. Максимальная мощность МГТЭС, ТЭЦ и ТЭС.

Исходные расчетные данные и результаты расчетов приведены в таблице 3, где максимальная мощность РИСЭ принята 50% от установленной мощности, мощность ТЭЦ и МГТЭС заданы с учетом ремонтных работ, ВИЭ в зависимости от моделируемых природных факторов в различных периодах.

Таблица 3. *Расчет различных сценариев энергообеспечения*

Номер сценария	Нагрузка потребления, МВт	Максимальная мощность источников, МВт	Фактическая располагаемая мощность генерации, МВт	Дефицит мощности энергосистемы, 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

Выводы

1. Первый сценарий показал зависимость энегосистемы и потребителей от ВИЭ. Произошло отключение нагрузки потребителей порядка 190 МВт. Причиной данной ситуации послужило нехватка генерирующих мощностей, ограничения по перетоку с энергомостом, неблагоприятные метеофакторы.
2. Второй сценарий показал, что при благоприятных метеоусловиях в солнечный день и соответственно наличии дополнительной генерации ВИЭ при оперативном планировании и ведении режима энергосистемы отключения нагрузки потребителей не произошло. При этом появляется небольшой резерв мощности 76 МВт (РИСЭ и часть МГТЭС).
3. Третий сценарий показал зависимость энергосистемы и потребителей от ВИЭ. Произошло отключение нагрузки потребителей порядка 180 МВт. Причиной данной ситуации послужило нехватка генерирующих мощностей, ограничения по перетоку с энергомостом, неблагоприятные метеофакторы.
4. Четвертый сценарий при благоприятных метеоусловиях в солнечный день и вводе мощностей новых ТЭЦ, можно отказаться от дорогостоящих МГТЭС, РИСЭ даже при пиковых потреблениях электроэнергии.
5. Пятый сценарий при благоприятных метеоусловиях в солнечный день, вводе мощностей новых ТЭЦ, можно отказаться от дорогостоящих МГТЭС, РИСЭ. При этом возможна подача электроэнергии на материк по энергомосту порядка 434 МВт.

Список литературы

1. Кондратьев С. В., Агибалов С. В. Крым: снова с Россией. Аналитический отчёт. – Институт Энергетики и Финансов, 2014. – 38 с.
2. Энергомост в Крым. https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергомост_в_Крым
3. Энергетика Крыма сегодня. Обзор // Энергосовет. №2 (33) 2014. С. 52-55.
4. Энергетика Крыма. https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергетика_Крыма.

5. Четырнадцать мобильных ГТЭС генерируют электроэнергию для Крыма. https://ria.ru/society/20160101/1352835545.html.
6. Ветроэнергетика в 2018 году. https://os1.ru/article/17801-vetroenergetika-v-2018-godu.
7. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 120 с.

References

1. Kondratiev S. V., Agibalov S. V. Crimea: again with Russia. Analytical report. - Institute of Energy and Finance, 2014. - 38 p.
2. Energomost to the Crimea. https://ru.wikipedia.org/wiki/Energomost_v_Krym.
3. Energy Crimea today. Review // Energy Council. №2 (33) 2014. pp. 52-55.
4. Energy Crimea. https://ru.wikipedia.org/wiki/Energy_Crimea.
5. Fourteen mobile gas turbine power plants generate electricity for the Crimea. https://ria.ru/society/20160101/1352835545.html.
6. Wind power in 2018. https://os1.ru/article/17801-vetroenergetika-v-2018-godu.
7. Kostin V.N. Optimization problems of electric power industry: Tutorial. - SPb .: SZTU, 2003. - 120 p.

УДК 620.9:33

Технико-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем

Е.Г. Какушина[1], Б.А Якимович [2], В.В. Кувшинов[3],
П.Н. Кузнецов [4], С.И. Соломенникова [5].

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]littie@mail.ru, [2]yakimovich52@gmail.com, [3]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [4]pavelnik2@gmail.com,

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова», ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Россия, [5]S_Solomennikova@mail.ru

Статья поступила 09.11.2018 г.; после доработки 14.11.2018 г.

Аннотация

В статье рассмотрены подходы к формированию рациональных автономных солнечных энергетических систем на основе модульного принципа их построения. Предложены алгоритмы многоэтапного, многовариантного определения технико-экономических показателей оценки их эффективности при проектировании и эксплуатации.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная автономная модульная установка, фотоэлектрическая установка, технико-экономическое обоснование использования солнечных установок, алгоритм многоэтапного, многовариантного моделирования проектов.

Technical-economic aspects of development autonomous solar energy systems

E.G. Kakyshina[1], B.A. Yakimovich[2], V.V. Kuvshjnov[3],
P.N. Kyznetsov[4], C.I. Colomennikova[5]

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]littie@mail.ru, , [2]yakimovich52@gmail.com, [3]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [4]pavelnik2@gmail.com,

Izhevsk state technical university. M.T. Kalashnikov, 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russia.
[5]S_Solomennikova@mail.ru

Received 09.11.2018 y.; received in final form 14.11.2018 y.

Abstract

The article considers approaches to the formation of rational autonomous solar energy systems based on the modular principle of their construction. Algorithms for a multi-stage, multivariate definition of technical and economic indicators for assessing their effectiveness in design and operation are proposed.

Keywords: renewable energy sources, solar autonomous modular installation, photovoltaic installation, feasibility study on the use of solar installations, algorithm of multi-stage, multi-variant modeling of projects.

Введение

Реализация инновационных проектов в области энергетики требует первоначальных значительных затрат. Прежде всего это относится к возобновляемой энергетике. Актуальной является задача предварительной технико-экономической оценки при создании автономных солнечных энергосистем [1].

Как правило, в данной сфере для анализа используются такие экономические показатели, как чистая приведенная стоимость, внутренняя норма рентабельности, срок окупаемости проекта [2].

Не менее важным, а в некоторых случаях определяющими являются такие факторы, как конструктивно-технологическая сложность энергетического оборудования, возможное максимальное время его эксплуатации, изменение цены на реализуемые результаты, местоположение объекта, для которого предназначено данное оборудование. Необходимо также учитывать и влияние стратегических факторов, таких как наличие и реализация национальной энергетической среднесрочной программы на ближайшие 10-15 лет, эффективной законодательной базы и др.

Постановка задачи исследования

Целью данной работы является исследование и выбор совокупности технико-экономических показателей оценки эффективности автономных солнечных энергетических систем и формирование на основе их использования отечественных солнечных энергетических модулей.

Особенности проектов по созданию автономных солнечных энергетических систем заключаются в многоэтапности и в многовариантности их реализации.

Ключевым этапом в предлагаемом алгоритме, на наш взгляд, является этап исследования и обоснования актуальности проекта, а также формирование бизнес-плана.

Остановимся на них более подробно.

Важными следует считать такие показатели как: экономичность, надежность (безотказность в работе), местоположение объекта, формирование новых рынков для солнечной энергетики.

С точки зрения экономичности, как показывает предварительный анализ стоимости электроэнергии, получаемой традиционными методами, средний срок окупаемости автономных солнечных электростанций составляет 10-15 лет и выше и в дальнейшем рассматриваться в данной статье не будет.

Бизнес-план должен содержать следующие разделы: необходимая информация о проекте; достоверная информация об инициаторах проекта; наличие партнеров; продукция, услуги, потребности рынка; источники финансирования; привлекательность для инвесторов; необходимое и достаточное описание проекта и распределение затрат по этапам проекта; финансовый план и прогнозирование его реализации; экологические аспекты, дополнительные документы.

Последовательность этапов представим в следующем виде (рис.1).

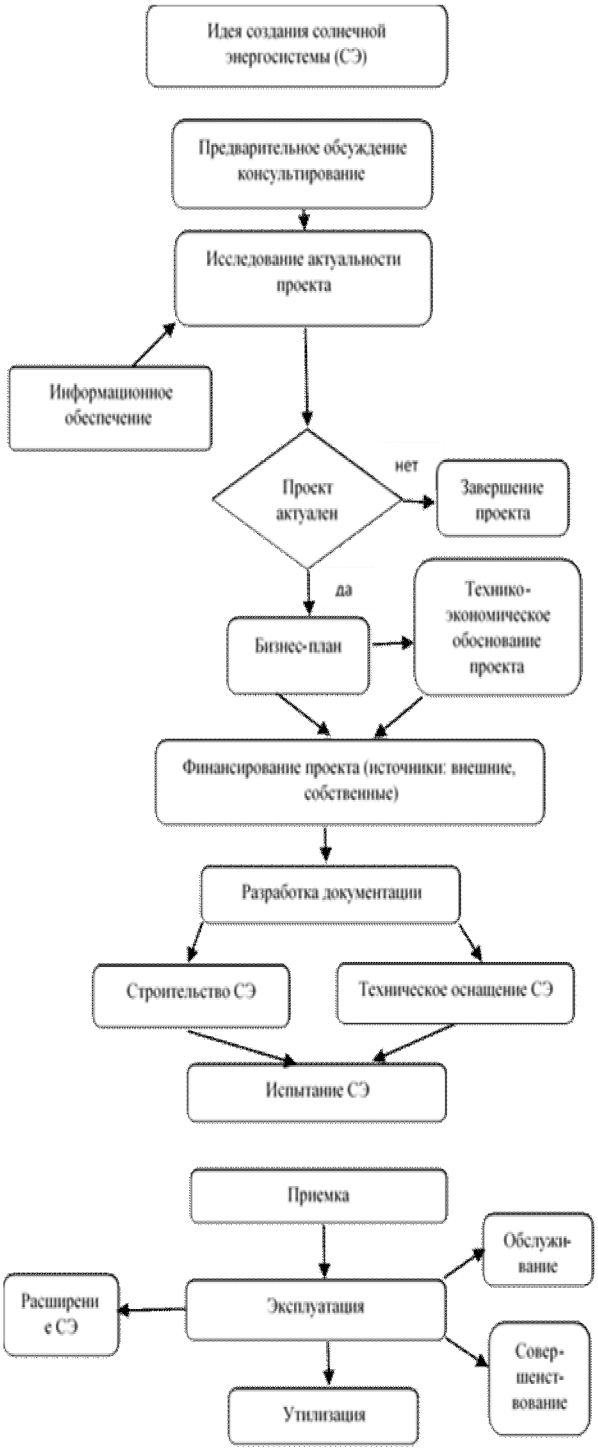

Рис. 1. Последовательность этапов.

В бизнес-плане следует учесть следующие риски:

- риски, связанные с инициатором проекта;
- конструкторско-технологические риски;
- риски, связанные с поставщиками;
- финансовые риски;
- экологические риски;
- риски, связанные с продажей продукции (услуг).

Для небольших проектов, обеспеченных фи-анонсированием, возможно использование подхода, основанного на модели «Резервы-ресурсы-результаты» [3].

Исходные данные по проекту предусматривают:

– Обоснование мощности объекта;
– Солнечные модули (панели) - варианты;
– Инверторы – варианты;
– Кабельные сети и коммутационные силовые щиты;
– Трансформаторы и распределительные устройства;
– Опорные металлоконструкции и т.д.;
– Обоснование численности персонала: по согласованию с работодателем и заказчиком работник данного предприятия может совмещать основную работу с работой по обслуживанию солнечной станции (после обучения);
– Технико-экономические показатели объекта;
– Обоснование эффективности инвестиций;
– Техническое задание на проектирование;
– Приложения: паспорта на основное оборудование.
– Расчет категории сложности.

В качестве результатов исследования и использования предложенного алгоритма рассмотрим технико-экономическое обоснование автономной модульной солнечной установки для обеспечения электроэнергией диспетчерской конечного маршрута № 10 ГПУ "Севэлектроавтотранс им. А.С. Круподёрова"

Автономный солнечный модуль состоит из следующих компонентов:

– Фотоэлектрические модули (Delta BST 310-24 P);
– Гибридный инвертор (МАП DOMINATOR 48В);
– Аккумуляторы (AKB LIFE 240);
– Солнечный контроллер (КЭС MPPT PRO 200-100);
– Разъем для солнечной панели (MC4);
– Разъем для солнечной панели (MC4-Y);

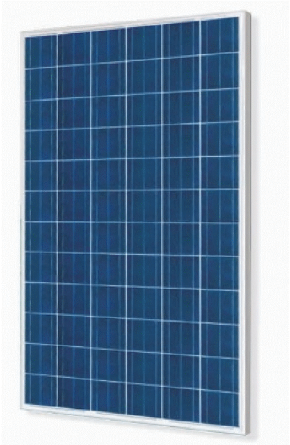

Рис. 2. Фотоэлектрический модуль, Delta BST 310-24 P.

Системообразующим компонентом, предлагаемой энергосистемы, является гибридный инвертор (рис.3), технические параметры которого позволяют определить предельное количество фотоэлектрических панелей (рис.2), аккумуляторных батарей (рис. 4) и солнечного контроллера (рис. 5).

Рис. 3. Гибридный инвертор, МАП DOMINATOR 48В.

Рис. 4. Аккумуляторы, AKB LIFE 240.

Предлагаемый подход позволяет эффективно решать следующие задачи: формировать солнечные энергосистемы различной мощности, определять направления совершенствования компонентов солнечной энергосистемы, исходя

из значений предельных технических параметров и стоимости их изготовления, повысить качество и производительность строительства объектов на базе подобных модулей и ряд других задач.

Рис. 5. Солнечный контроллер КЭС MPPT PRO 200-100.

Отметим также, что при меньшей мощности, вырабатываемой электроэнергии автономными солнечными энергосистемами технические параметры гибридного инвертора будут избыточны. Это позволяет рассмотреть задачу совершенствования инвертора и уменьшения затрат на его изготовление. Разъемы, для солнечных панелей представленные на рис. 6 и рис. 7.

Рис. 6. Разъем для солнечной панели, MC4.

Рис. 7. Разъем для солнечной панели, MC4-Y.

Для работы установки необходимо следующее дополнительное оборудование:

– Сетевой фильтр подавления (ЭМП - DL 50D3);
– Устройство защиты от молний и наводок (UZIP);
– Трех полочный стеллаж (STELLAZH 3);
– Система удаленного мониторинга (MALINA);
– Крепежи;
– Сплит-система (Mitsubishi Electric MSZ-FH35VE / MUZ-FH35VEHZ);
– Опорные металлоконструкции;
– Коммутационные силовые щиты;
– Кабель (КГ 1х16 Конкорд).

Результаты технико-экономических исследований

Стоимость реализации проекта составляет 4178154 руб. и включает в себя:

– Разработку документации;
– Строительно-монтажные работы;
– Обучение персонала;
– Модульную солнечную установку мощностью 6 кВт (выдача в пике от АКБ 12 кВт) с возможностью наращивания мощности;
– Дополнительное оборудование для работы модульной солнечной установки.

Расчет окупаемости по предлагаемому проекту

Затраты по предлагаемому проекту:

$$З_{пп} = Р_{д} + СМР + О_{п} + МСУ + ДО \quad (1)$$

где: $З_{пп}$ – затраты по предлагаемому проекту (руб.); $Р_{д}$ – разработка документации (руб.); $СМР$ - строительно-монтажные работы (руб.); $О_{п}$ - обучение персонала (руб.); $МСУ$ - стоимость модульной солнечной установки (руб.); $ДО$ - стоимость дополнительного оборудования для работы модульной солнечной установки. (руб.).

Затраты по альтернативному проекту (по предварительным данным заказчика), согласно формуле (1):

$$З_{ап} = 3989154 \text{ (руб.)}$$

Эффективность по предлагаемому проекту (экономия)

$$Э = З_{пп} - З_{ап} \quad (2)$$

где: $Э$ - эффективность по предлагаемому проекту (руб.); $З_{пп}$ – затраты по предлагаемому проекту (руб.); $З_{ап}$ – затраты по альтернативному проекту (руб.); $Э = -189000$ (руб.)

С учетом выработки электроэнергии срок окупаемости по предлагаемому проекту составит 5 лет.

Для оценки функциональных характеристик всей системы были проведены сравнительные исследования заводских промышленных фотоэлектрических модулей солнечной установки.

Исследования проводили в натурных условиях на крыше ГПУ "Севэлектроавтотранс им. А.С. Круподёрова", при естественном постоянном солнечном освещении, полученные данные сравнивали с паспортной вольтамперной характеристикой заводских элементов. При проведении исследований использовался метод прямых измерений характеристик фотопреобразователя по току и напряжению при переменном нагрузочном сопротивлении.

При проведении экспериментов (ясный солнечный день) освещенность составляла около 950 Вт/м2, соответственно максимальная мощность установки составляла около 5700 Вт. Экспериментальные значения вольт-амперных характеристик термофотоэлектрического модуля были получены при различных температурных показателях [4]. Эти показатели соответствовали различным временам года при круглогодичной работе установки.

Электрическая мощность установки изменяется прямо пропорционально изменению КПД фотоэлементов. Т.к. коэффициент k максимально составляет приблизительно 0,005, то падение КПД, и соответственно мощности, на 1°С будет максимально составлять 0,5 %.

$$P_{ФЭ} = S_{КУ} E_o \eta_{ФЭ} = \\ = S_{КУ} E_o \left(f_{КУ} \eta_o (1 - k(T_{ФЭ} - \mathrm{T}_o)) \right) \quad (3)$$

где: $S_{КУ}$ –площадь рабочей поверхности установки (м^2); E_o – освещенность рабочей поверхности (Вт/ м^2); $\eta_{ФЭ}$ – электрический КПД фотоэлектрической установки; $f_{КУ}$ - коэффициент заполнения солнечными элементами приемной поверхности модуля; η_o – КПД фотоэлементов при температуре T_o=25°С; k – температурный коэффициент изменения КПД фотоэлементов (составляет 0,3-0,5 % на 1°С); $T_{ФЭ}$ – температура фотоэлементов при работе установки. Из формулы (3) видно, что фотоэлектрическая мощность установки равна произведению площади $S_{КУ}$ рабочей поверхности, E_o освещённости рабочей поверхности установки и КПД фотоэлектрического модуля с учетом коэффициента заполнения и температуры рабочей поверхности установки [5]. Согласно формуле (3) при температуре +55°С, КПД и мощность может упасть на 15 % при температуре +35°С [6], на 5 %, а при температуре + 0°С, возрастает на 12,5% (особенно эффективно работает модуль зимой при Т = 0°С [4]). Это актуально при установке теплового насоса: летом для охлаждения и зимой для обогрева. Экспериментальные данные показали, что регулирования температурного режима рабочей поверхности солнечной установки может значительно увеличивать выработку фотоэлектрической части установки почти в два раза.

Выводы

1. Для успешного проектирования солнечной электростанции были учтены следующие параметры:
   - Индивидуальные особенности, характерные для участка, выбранного для строительства: крыша здания (основные технологические, строительные и архитектурные особенности участка для установки солнечной станции)
   - Ориентация участка под строительство относительно сторон света.
   - Степень затененности – какое влияние будут оказывать на солнечные батареи, расположенные рядом высокие объекты (здания, трубы, деревья и т.д.).
   - Особенности инсоляции для конкретной географической точки – суммарное количество солнечного излучения, которые могут оказать влияние на объемы вырабатываемой электроэнергии.
   - Выбор оптимального угла наклона солнечных модулей, который обеспечит получение максимального количества солнечного излучения и как следствие максимизирует выработку электроэнергии солнечной электростанции.
2. Использование фотоэлектрических систем с аккумуляторными станциями позволяет увеличить выработку электроэнергии фотоэлектрическими установками за счёт более полного преобразования потока падающей солнечной радиации даже при неблагоприятных погодных условиях и малых углах падения солнечных лучей на приёмную поверхность [4].
3. Качественное проектирование автономной солнечной модульной энергосистемы приводит к сокращению затрат на проектирование за счет корректного технико-экономического обоснования и к увеличению среднегодовой выработки электриче-

ской энергии более чем на 20 %.

Список литературы

1. Башта А.И. Экономическое обоснование использования гелиопрофиля для автономного энергосберегающего дома / А.И. Башта, В.В. Кувшинов // Вестник социально-экономических исследований. – Одесса, 2011. С. 12-16.
2. Франтишек Я. Энергия настоящего и будущего / Я. Франтишек// Монография. 2014.С.111-113
3. Мамрыкин О.В. Модель управления проектами. Освоение новых изделий машиностроения /А.П. Кузнецов, Б.А. Якимович //Высокие технологии в механике. Материалы научно-практической конференции ИжГТУ – 2002. С. 46.
4. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Косий А.Г. // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.
5. 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.
6. 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.

References

1. Bashta A.I. Economic justification of using the helio profile for an autonomous energy-saving house / A.I. Bashta, V.V. Kuvshinov // Bulletin of Social and Economic Research. - Odessa, 2011. - P. 12-16.
2. Frantisek J. Energy of the present and future / J. Frantisek // Monograph. 2014. P.111-113
3. Mamrykin O.V. Project Management Model. The development of new engineering products / A.П Kuznetsov, B.A. Yakimovich // High technologies in mechanics. Materials of the scientific-practical conference IzhSTU - 2002. P. 46.
4. Kuvshinov V.V. Investigation of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module RS-250 / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina, A.G. Kosiy // Power plants and technologies. 2017. T. 3. № 3. P. 73-78.
5. Kuvshinov V.V. Change in power characteristics of photo-electric installations at various climatic factors / V.V. Kuvshinov // Power plants and technologies. 2017. T. 3. No. 2. P. 61-66.
6. 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.

УДК.621.315.1

Технико-экономический анализ эффективности применения вставок постоянного тока в электроэнергетике

В.В. Смирнов[1], М.А. Старченко[2], Т.С. Максименко[3], Е.Ю. Чернова[4], А.И. Кавун[5]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. [1]svadick@mail.ru,
[2]warrior2me@gmail.com, [3]tausik.maxy@yandex.ru, [4]nikekaterina6@gmail.com, [5]avraam.kavun@mail.ru

Статья поступила 19.11.2018 г.; после доработки 23.11.2018 г.

Аннотация

В ряде случаев объединение двух или более энергосистем невозможно по причине либо различных номинальных частот, либо по причине их несинхронной работы. В этом случае для обеспечения связи между такими системами применяются вставки постоянного тока. В данной статье рассмотрено основное оборудование вставок постоянного тока и проведен сравнительный технико-экономический анализ.

Ключевые слова: вставка постоянного тока, высоковольтный тиристорный вентиль, преобразовательный мост, технико-экономический анализ.

Technical and economic performance analysis of back-to-back high voltage direct current tie in power industry

V.V. Smirnov[1], M.A. Starchenko[2], T.S. Maximenko[3], K.Yu. Chernova[4], A.I. Kavun[5]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. [1]svadick@mail.ru,
[2]warrior2me@gmail.com, [3]tausik.maxy@yandex.ru, [4]nikekaterina6@gmail.com, [5]avraam.kavun@mail.ru

Received 19.11.2018 y.; received in final form 23.11.2018 y.

Abstract

In some cases, the integration of two or more power systems is impossible either because of different nominal frequencies or because of their asynchronous operation. To ensure communication between such systems, back-to-back high voltage direct current ties are used. This article discusses the main equipment of back-to-back high voltage direct current ties and a comparative technical and economic analysis.

Keywords: back-to-back high voltage direct current tie, high-voltage thyristor valve, converter bridge, technical and economic performance analysis.

Введение

Простота конструкции электродвигателей переменного тока и их высокая степень надежности, а также простота трансформации переменного тока обусловили повсеместное его использование: большая часть выработки, передачи, распределения и потребления электроэнергии происходит на переменном токе.

Тем не менее, в случаях, когда стоит задача объединить две или более существенно развитых энергосистемы, работающих на разных но

минальных частотах, либо несинхронно, применяют постоянный ток, потому что обеспечить связь между такими системами на переменном токе затруднительно или вовсе невозможно.

Преобразовательная подстанция, которая выпрямляет переменный ток одной частоты, а затем инвертирует выпрямленный постоянный

ток в ток с заданной частотой и напряжением, называется вставкой постоянного тока (ВПТ).

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является проведение технико-экономического анализа, на основании которого можно сделать вывод об эффективности применения ВПТ в электроэнергетике. Такой анализ необходим, поскольку объединение энергосистем оказывает положительный экономический эффект в виде укрупнения единичных мощностей агрегатов и электростанций, и позволяет снизить необходимую суммарную мощность резервных агрегатов за счет объединения резервов, а также очевидный технический эффект, связанный со стабилизацией режимов объединяемых энергосистем.

Для выполнения поставленной цели необходимо:

- Рассмотреть конструкцию ВПТ и ее основное оборудование;
- На основании данных о капитальных затратах на строительство ВПТ какой-либо конкретной мощности, найти удельную стоимость такой преобразовательной подстанции на единицу мощности и сравнить с соответствующим значением удельной стоимости для подстанции (ПС) переменного тока;
- Проанализировать величину ежегодных отчислений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание ВПТ, найти соответствующие издержки, сравнить их величину с величиной издержек для ПС переменного тока такой же мощности;
- Определить минимум приведенных затрат для ВПТ и ПС переменного тока, сравнить полученные данные.
- Сделать вывод о целесообразности применения вставок постоянного тока для объединения энергосистем, учитывая, как экономические показатели, так и технический эффект, обусловленный таким объединением.

Конструкция вставок постоянного тока

Вставки постоянного тока выполняются путем параллельного включения нескольких преобразовательных блоков, каждый из которых имеет относительно невысокое выпрямленное напряжение, что позволяет существенно упростить конструктивную часть. Количество блоков определяется общей мощностью ВПТ. В схеме ВПТ (рис.1) выпрямитель и инвертор расположены на одной подстанции, что позволяет конструктивно объединить их в один преобразовательный блок.

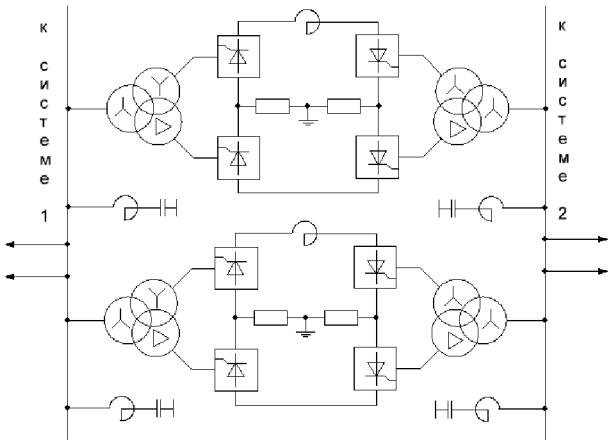

Рис. 1. Схема вставки постоянного тока.

Основными элементами вставок постоянного тока являются преобразователи – выпрямитель и инвертор. В качестве преобразователей используются статические управляемые вентильные преобразователи. Эти преобразователи могут быть двух типов – преобразователи с неполностью управляемыми вентилями и преобразователи с полностью управляемыми вентилями.

К первому типу относится трехфазная мостовая схема (рис. 2). Она состоит из обычных тиристоров, у которых контролируется только момент их открытия путем подачи маломощного управляющего импульса на управляющий электрод вентиля. Управление схемой производится посредством системы управления, регулирования, защиты и автоматики (СУЗРА). Система управления (СУ) в заданный момент времени, определяемый системой автоматического регулирования (САР), генерирует управляющие импульсы, передает их с потенциала земли на потенциал моста и распределяет по тиристорам. Система защиты (СЗ) и система автоматики (СА) в случае возникновения аварийного режима воздействует на СУ, закрывая или открывая управляющие импульсы [1].

Практически все существующие ВПТ выполнены с использованием трехфазной мостовой схемы. Существенным недостатком преобразователя этого типа является то, что при работе он потребляет из сети значительную реактивную мощность и имеет сугубо несинусои-

дальную форму тока фазы сети. В связи с этим, необходима установка фильтрокомпенсирующих устройств достаточно большой мощности, что увеличивает издержки и капиталовложения.

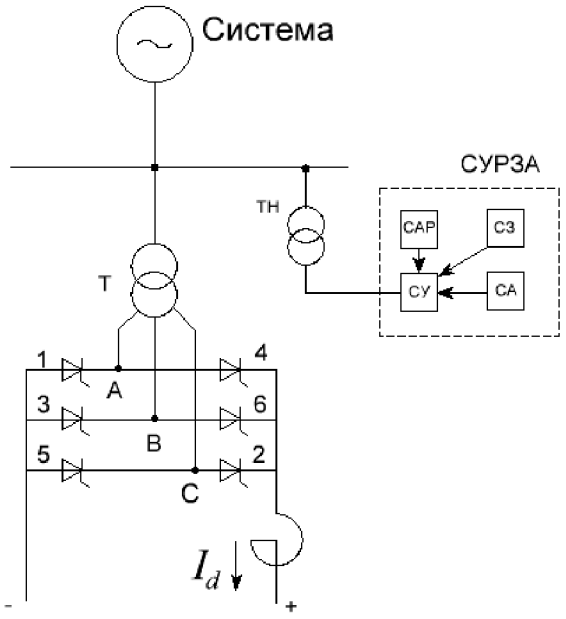

Рис. 2. Принципиальная схема трехфазного преобразовательного моста с блоками СУЗРА: Т – силовой трансформатор; ТН – трансформатор напряжения; 1-6 – тиристорные вентили

Второй тип преобразователей, получивших название преобразователей напряжения, был создан, благодаря разработке мощных силовых транзисторов. Они обладают рядом преимуществ перед преобразователями первого типа, однако широкого распространения пока не получили.

Основным оборудованием вставок постоянного тока являются высоковольтные тиристорные вентили (ВТВ), а также система управления и регулирования преобразовательного моста. Основным конструктивным элементом ВТВ является модуль, представляющий собой, самостоятельный вентиль со своими системами управления и сигнализации, но рассчитанный на меньшее напряжение, чем ВТВ в целом. Модули соединяются последовательно и размещаются в специальной изолирующей конструкции, являющейся также каркасом.

Каждый модуль имеет ряд одинаковых взаимозаменяемых тиристорных ячеек, соединенных последовательно. В тиристорную ячейку входят тиристор, блок управления и все вспомогательные элементы, обеспечивающие равномерное распределение напряжения между тиристорами в модуле. Для распределения напряжения между ячейками применяются резистивно-емкостные делители, а для защиты от перенапряжений – встречно включенные лавинные диоды.

Рассмотрим компоновку вентильного зала ВПТ (рис. 3.). Преобразовательные трансформаторы устанавливаются вплотную к зданию вентильного зала с обоих сторон, и выводы их вентильных обмоток проходят сквозь стены, присоединяясь к ошиновке мостов. Внутри зала располагаются мосты выпрямителя и инвертора. Сглаживающий реактор между выпрямителем и инвертором устанавливается аналогично трансформаторам. Благодаря этому получается весьма компактная конструкция.

Технико-экономический анализ ВПТ

Будем исходить из того, что необходимо произвести технико-экономические расчеты (ТЭР) для вставки постоянного тока мощностью 1000 МВт, имеющей связь с двумя системами по линиям 330 кВ. Постоянное напряжение, принятое для ВПТ, равно ±60 кВ. Преобразование осуществляется в четырех вентильных залах мощностью 355 МВт.

Поскольку вставка постоянного тока является преобразовательной подстанцией, с точки зрения ТЭР, ее можно рассматривать как обычную подстанцию, а значит к ней применимы все соответствующие методы ТЭР.

Определим капитальные затраты, пользуясь укрупненными показателями. Для связи с системами примем 12 автотрансформаторов АТДЦТН-200000/330/110, по 6 штук на каждую [3].

Стоимость определится следующим образом:

$$K_{тр.впт} = m \cdot K_{тр.} =$$
$$= 12 \cdot 21250 = 255000 \quad тыс.руб$$

Где m – количество трансформаторов;
$K_{тр.}$- капитальные затраты на один трансформатор.

Постоянную часть затрат по ВПТ можно считать равной постоянной части затрат по ПС-330 кВ при полуторной схеме распределительного устройства:

$$K_{пч} = 95000 \quad тыс.руб.$$

Капитальные затраты на компенсирующие, защитные устройства, релейную защиту и систему охлаждения учтем в стоимости вентильного зала ВПТ с ВТВ. Его среднерыночная стоимость для значений мощности, близких к заданной:

$$K_{в.з.} = 985000 \quad тыс.руб.$$

Таких зала 4, поэтому:

$$К_{в.з.сум.} = т \cdot К_{в.з.} =$$

$$= 4 \cdot 985000 = 3940000 \quad тыс.руб.$$

Найдем суммарные капитальные затраты ВПТ:

$$К_{впт} = К_{тр.впт} + К_{пч} + К_{в.з.сум.} =$$

$$= 255000 + 95000 + 3940000$$

$$К_{впт} = 4290000 \quad тыс.руб.$$

Определим удельную стоимость:

$$К_{уд.впт} = \frac{К_{впт}}{Р_{ном.впт.}} = \frac{429 \cdot 10^7}{10^6} = 4290 \frac{руб.}{кВт}$$

Или

$$К_{уд.впт} \approx 66 \quad \frac{долл}{кВт}.$$

Что соответствует величине, приведенной в [2]. Таким образом, удельная стоимость ВПТ в 2-3 раза превышает удельную стоимость обычной ПС, для которой характерно значение:

$$К_{уд.пс} \approx 20 - 40 \quad \frac{долл}{кВт}.$$

Проанализируем величину ежегодных отчислений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание ВПТ. Ежегодные отчисления на амортизацию включают издержки на капитальный ремонт и накопление средств, необходимых для замены изношенного и морально устаревшего оборудования. Вставки постоянного тока содержат высоковольтные тиристорные преобразователи, срок службы которых значительно меньше, чем у силового оборудования обычной подстанции, поэтому величина ежегодных отчислений будет, соответственно, больше:

$$б_{а.впт.} = 8{,}1 \quad \%$$

Ежегодные отчисления на текущий ремонт и обслуживание ВПТ отличаются от аналогичных для ПС незначительно:

$$б_{р.впт.} = 2{,}2 \quad \%$$

$$б_{о.впт.} = 1{,}6 \quad \%$$

Суммарно:

$$б_{сум.} = б_{а.впт.} + б_{р.впт.} + б_{о.впт.} =$$

$$= 8{,}1 + 2{,}2 + 1{,}6 = 11{,}9 \quad \%$$

Значения сведем в таблицу 1

Таблица 1.

Вид ежегодного отчисления, %	Тип объекта	
	ВПТ	ПС
$б_{а.впт.}$	8,1	6,4
$б_{р.впт.}$	2,2	1,5
$б_{о.впт.}$	1,6	1,5
$б_{сум.}$	11,9	9,4

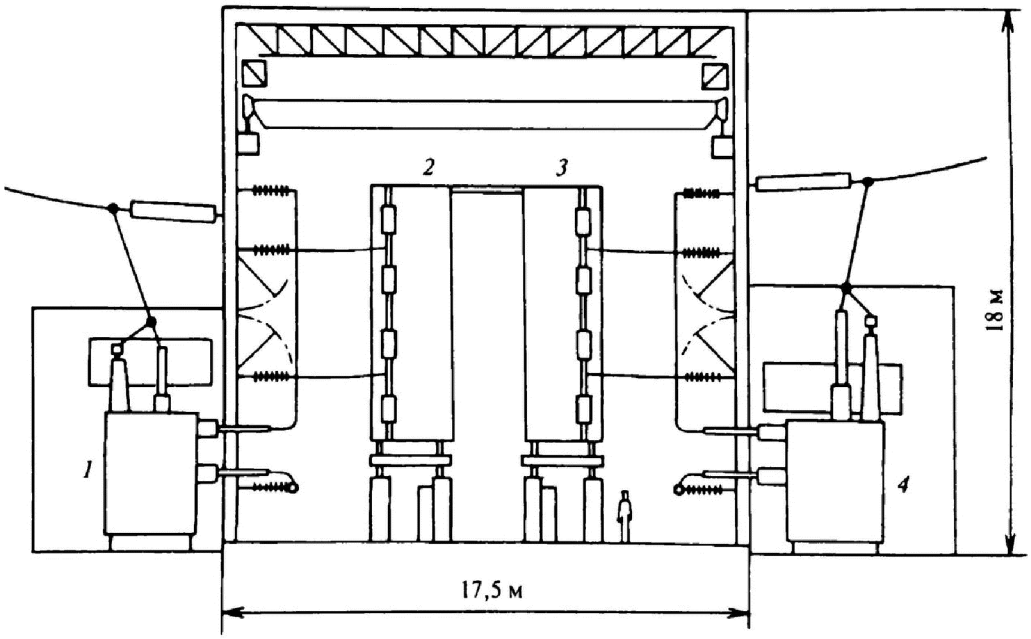

Рис. 3. Компоновка вентильного зала ВПТ: 1 – трансформатор выпрямителя; 2 – ВТВ выпрямителя; 3 – ВТВ инвертора; 4 – трансформатор инвертора.

Произведем расчет издержек. Зная удельную стоимость ПС, найдем стоимость ПС мощностью 1000 МВт:

$$К_{пс} = К_{уд.пс} \cdot 1000 =$$

$$= 30 \cdot 10^6 = 30000000 \quad долл.$$

Или в рублях:

$$К_{пс} = 1980000 \quad тыс.руб.$$

Величина издержек без учета потерь электроэнергии:

$$И_{впт} = \frac{б_{а.впт.} + б_{р.впт.} + б_{о.впт.}}{100} \cdot К_{впт}$$

$$И_{впт} = \frac{8{,}1 + 2{,}2 + 1{,}6}{100} \cdot 4290000 =$$

$$= 510510 \quad тыс.руб.$$

$$И_{пс} = \frac{б_{а.пс.} + б_{р.пс.} + б_{о.пс}}{100} \cdot К_{пс} =$$

$$= \frac{6{,}4 + 1{,}5 + 1{,}5}{100} \cdot 1980000 =$$

$$= 186120 \quad тыс.руб.$$

Определим во сколько раз отличаются издержки:

$$\frac{И_{впт}}{И_{пс}} = \frac{510510}{186120} = 2{,}7.$$

Приведенные затраты найдем следующим образом:

$$З_{впт} = р_н \cdot К_{впт} + И_{впт} =$$

$$= 0{,}12 \cdot 429 \cdot 10^4 + 510510 =$$

$$= 1025310 \quad тыс.руб.$$

$$З_{пс} = р_н \cdot К_{пс} + И_{пс} =$$

$$= 0{,}12 \cdot 198 \cdot 10^4 + 186120 =$$

$$= 423720 \quad тыс.руб.$$

где $р_н$ - нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений,

$$р_н = 0{,}12 \quad \frac{1}{год}.$$

Определяем также во сколько раз отличаются приведенные затраты:

$$\frac{З_{впт}}{З_{пс}} = \frac{1025310}{423720} = 2{,}4 \cdot$$

Все рассчитанные величины сведем в общую таблицу (таблица 2).

Таким образом, величины, характеризующие экономические затраты для ВПТ в 2,5-3 раза больше, чем соответствующие для подстанции переменного тока. Тем не менее, делать вывод о целесообразности применения вставок постоянного тока можно лишь учитывая тот технический эффект, который они оказывают на связываемые энергосистемы.

Таблица 2

Показатель	Тип объекта	
	ВПТ	ПС
$б_{сум.}$, %	11,9	9,4
$К_{уд.}$, $\frac{руб}{кВт}$	4290	1980
$К$, *тыс.руб.*	4290000	1980000
$И$, *тыс.руб.*	510510	186120
$З$, *тыс.руб.*	1025310	423720
$\frac{И_{впт}}{И_{пс}}$	2,7	
$\frac{З_{впт}}{З_{пс}}$	2,4	

Так, вставки постоянного тока являются гибким управляемым звеном, которое обеспечивает регулируемые перетоки мощности. Если в одной из систем возникнет какой-либо переходный процесс, вызванный, например, аварийным отключением значительного количества источников электроэнергии или передающих линий, возмущение не передастся во вторую систему. Таким образом, системы, объединенные с помощью ВПТ, менее подвержены каскадному развитию аварии и оказывают стабилизирующий эффект. Но тогда высокая стоимость вставок постоянного тока будет частично компенсироваться за счет предотвращения теоретически возможного простоя рабочих и массового недоотпуска продукции, которые в случае аварии произойдут с большей вероятностью при использовании подстанций переменного тока.

Следует также учитывать, что объединение энергосистем позволяет укрупнять единичные мощности агрегатов и электростанций, что делает их более экономичными, а также снижать необходимую суммарную мощность резервных агрегатов за счет объединения резервов. В случаях, когда такое объединение производится для систем с разной номинальной частотой, то есть когда использование подстанций постоянного тока невозможно, дороговизна ВПТ частично компенсируется за счет вышеуказанного укрупнения единичных мощно-

стей агрегатов электростанций и объединения резервов.

Заключение

Проведенный сравнительный технико-экономический анализ эффективности использования вставок постоянного тока позволяет сделать следующее заключение:

- Стоимость вставок постоянного тока оказывается в 2-3 больше, чем стоимость традиционной подстанции переменного тока, однако поскольку это направление является приоритетно развивающимся и наметилась тенденция на объединение энергосистем стран мира, следует ожидать постепенное уменьшение стоимости ВПТ;
- Вставки постоянного тока несмотря на высокую стоимость оказывают положительный технический эффект, обеспечивая перетоки мощности между системами и стабилизируя режимы их работы;
- Применение вставок постоянного тока для объединения энергосистем позволяет уменьшить последствия от крупных аварий, поскольку возмущения, произошедшие в одной системе не передаются во вторую, и таким образом, вероятность каскадного развития аварии и развала системы меньше;
- Дороговизна ВПТ частично компенсируется тем, что при объединении энергосистем возможно укрупнение единичных мощностей агрегатов и электростанций, и снижение необходимых суммарных мощностей резервных агрегатов за счет объединения резервов;

Список литературы

1. Электротехнический справочник: в 4 т. Т3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. Ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 10-е издание, стереот. – Издательский дом МЭИ, 2009. – 964 с.
2. Ю.П. Рыжов Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: Учебник для вузов/Ю.П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.
3. ОАО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» - «Укрупненные стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35-1150 кВ» - Москва 2007.

References

1. Electrotechnical Handbook: 4 t. T3. Production, transmission and distribution of electric energy / Under total. Ed. Professors MEI V.G. Gerasimov et al. (Ch. Red. AI Popov). - 10th edition, stereo. - Publishing house MEI, 2009. - 964 p.
2. Yu.P. Ryzhov Long-distance power transmission of ultra-high voltage: A textbook for universities / Yu.P. Ryzhov. - M .: Publishing House MEI, 2007. - 488 p.
3. JSC “Design and survey and research institute for the design of energy systems and electrical networks “ENERGOSETPROEKT” “Integrated cost indicators of power transmission lines and substations of 35-1150 kV”- Moscow 2007

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.039

Развитие многокритериальных подходов к оценке конкурентоспособности электростанций с атомным и неатомным энергоисточником

А.Л. Баланин[1], А.В. Гроль[1], А. В. Гурин[1], Д.А. Крылов[1], В.А. Невиница[1], П.С. Теплов[1], П.А. Фомиченко[1], Е.В. Марова[2], А.М. Маслов[2], С.Ф. Шепелев[2]

[1] *Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Москва, 123182, Россия, Neviniza_VA@nrcki.ru*

[2] *Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения имени И.И. Африкантова», Нижний Новгород, 603074, Россия*

Статья поступила 31.10.2018 г.; после доработки 02.11.2018 г

Аннотация

В работе представлены методические подходы и результаты многокритериального анализа конкурентоспособности энергоблока БН-1200 в сравнении с ядерными и неядерными энерготехнологиями. С учётом необходимости оценки перспективы развития энерготехнологий, решающих задачи не только эффективного и безопасного производства электроэнергии и тепла, но и обеспечения стабильности энергетического сектора, разработанный перечень критериев конкурентных преимуществ объединил экономические показатели и показатели, характеризующие безопасность, влияние на экологию, риски реализации проектов, перспективы развития, состояние инфраструктуры.

Ключевые слова: БН-1200, ВВЭР, двухкомпонентная ядерная энергетика, конкурентные преимущества, многокритериальный анализ.

The Development of Multi-Criterial Approaches to Assess the Competitiveness of Power Plants with Nuclear and Non-Nuclear Energy Sources

A. L. Balanin[1], A. V. Grol[1], A. V. Gurin[1], D.A. Krylov[1], V.A. Nevinitsa[1], P.S. Teplov[1], P.A. Fomichenko[1], E. V. Marova[2], A.M. Maslov[2], S.F. Shepelev[2]

[1] National Research Centre “Kurchatov Institute”, 123182, Moscow, Russia, *Neviniza_VA@nrcki.ru*

[2] *I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering, 603074, Nizhny Novgorod, Russia*

Received 31.10.2018 y.; received in final form 02.11.2018 y

Abstract

The paper presents methodological approaches and results of multi-criteria analysis of the competitiveness of BN-1200 power unit in comparison with nuclear and non-nuclear power technologies. Taking into account the need to assess the prospects for the development of energy technologies that solve the problems of not only efficient and safe electricity production and production, but also ensure the economic stability of the energy business, the developed list of criteria for competitive advantages combined economic indicators and indicators characterizing safety, environmental impact, risks of design implementation, prospects for development, and infrastructure.

Keywords: BN-1200, VVER, two-component nuclear energy system, competitive advantages, multicriteria analysis

Постановка задачи и выбор направления исследований

Определение пути оптимального развития энергетики, обеспечивающего возрастающие потребности промышленности при максимальном возможном сохранении окружающей среды, приобретает всё большую актуальность. Задачи выбора энергетической технологии для

дальнейшего развития по своей природе изначально носят многофакторный (или многокритериальный, если подходить с точки зрения оценки выбора) характер. В первом приближении всегда существует привлекательность сопоставления исключительно по финансовым показателям, т.е. объектом сравнения становятся затраты на осуществление проекта и расходы на эксплуатацию, включая топливообеспечение. Как показала практика, такой подход почти сразу после реализации может привести к проблемам: например, учет дополнительных экологических требований заставит пересмотреть стоимость проекта.

В случае, когда для дальнейшего развития выбирается ядерный энергоисточник, финансовые показатели также не могут быть однозначным критерием конкурентоспособности установки. Например, при самых лучших технико-экономических параметрах ядерную энергоустановку нельзя продать за рубеж, если в проекте АЭС не предусмотрено осуществление гарантий МАГАТЭ. Т.е. в структуре оценки конкурентоспособности неизбежно появляются нефинансовые аспекты. С другой стороны, сами критерии оценки могут иметь сложную структуру, сочетая в себе как финансовые показатели, так и нефинансовые. Например, уже упомянутый вопрос, реализована возможность осуществления гарантий МАГАТЭ или нет, приобретает более сложный характер в том случае, если выбор идет между традиционной АЭС, получающей топливо с завода, и АЭС с пристанционным топливным циклом. Как показывают результаты работ [1, 2], и эксплуатационные, и капитальные затраты на осуществление гарантий МАГАТЭ на АЭС примерно на порядок ниже, чем затраты на осуществление гарантий на производстве топлива (а поскольку в случае реализации пристанционного топливного цикла на зарубежной АЭС, построенной по российскому проекту, гарантии МАГАТЭ придется осуществлять не только на собственно самой АЭС, но и на установках пристанционного топливного цикла, эти затраты автоматически усугубятся). При проведении анализа при сравнении подобных установок простой критерий (практически индикатор типа «ДА-НЕТ») становится сложным (Индикатор типа «ДА-НЕТ» и «Затраты на осуществление гарантий»). Приведенные примеры говорят о том, что никакой другой подход, кроме многокритериального, не может быть использован при оценке конкурентоспособности, и не всегда самая дешевая установка конкурентоспособна. Конкурентоспособность новых ядерных и неядерных технологий вовсе не означает, что они должны быть самым дешевым вариантом выработки электроэнергии в стране. На принятие решения может повлиять большое число трендов: безопасность энергоснабжения, стабильность ежегодных затрат и диверсификация энергоснабжения, то есть энергетический баланс различных технологий. В этой связи результаты объективной многокритериальной оценки воздействия объектов электроэнергетики на окружающую среду и здоровье населения также становятся чрезвычайно важными для выбора энерготехнологии.

Конъюнктура рынка энергоисточников диктует целый набор требований к новому ядерному энергоблоку, обеспечивающему не только экономически эффективное и безопасное производство электроэнергии и тепла, но и снижение социального, финансового и технологического обременения со стороны ОЯТ, повышения эффективности использования природного урана в условиях сокращения его дешевых запасов, повышения экспортной привлекательности ядерных технологий, в области которых РФ является признанным лидером, и т.д. Всё это соответствует стратегии Госкорпорации «Росатом» по замыканию ядерного топливного цикла и эффективно реализуется в двухкомпонентной ядерной энергетической системе, в которой энергоблоки с реакторами БН являются «партнерами» ВВЭР, а не конкурентами на рынке энергоисточников.

Результаты многокритериального анализа эффективности коммерческого энергоблока БН-1200М по сравнению с энергоблоками ВВЭР-ТОИ, АР-1000, угольными электростанциями, ПГУ, ВИЭ (комплекс солнечных и ветряных электростанций), полученные специалистами АО «ВНИИАЭС», НИЦ «Курчатовский институт», АО «ГНЦ РФ ФЭИ» под общим руководством и при участии АО «ОКБМ Африкантов», представлены в работе [3]. Настоящая работа посвящена в основном методическим вопросам формирования многокритериального подхода, выбора структуры критериев и подходам к оценке по выбранным критериям с учетом различий ядерных и неядерных энергоисточников. Поскольку каждая из организаций, вовлеченных в работу, пользовалась своим методом анализа, а затем результаты усреднялись, то в настоящей работе мы ограничимся для иллюстрации подхода опытом НИЦ «Курчатовский институт» и, также иллюстративным, приведением промежуточных результатов, предшествовавших работе [3], в которой выполнено обоб-

щение результатов, полученных всеми участниками многокритериального анализа.

В ходе многокритериального анализа была выполнена следующая работа:

- разработка матрицы критериев конкурентоспособности в части экономики, безопасности и надежности, нераспространения, физической защиты и т.д., а также методологии многокритериального анализа;
- поиск, систематизация, оценка и обоснование данных, необходимых для проведения анализа, таких как технико-экономические показатели, характеристики безопасности и воздействия на окружающую среду, инфраструктурные и институциональные аспекты, перспективы расширенного использования энерготехнологий;
- проведение многокритериального анализа.

Собственно работы по созданию матрицы включали в себя:

- формирование матрицы многокритериального анализа в части набора критериев, оценки и распределения их по областям оценки;
- назначение весов областей оценки и весов критериев;
- задание значений критериев;
- проведение расчётов с применением определённого метода;
- анализ результатов (включая анализ чувствительности результатов к изменениям входных параметров).

Общая структура матрицы, использованной в настоящей работе для выполнения многокритериального анализа, представлена в таблице 1 и на рис. 1.

Таблица 1. *Общая структура матрицы многокритериального анализа*

Области анализа и критерии	Вес критерия	Значение критерия
I. Экономические показатели (Э)		
Э.1 - Э.14		
II. Безопасность и надежность (Б)		
Б.1 - Б.8		
III. Зрелость технологии и риски (Р)		
Р.1 - Р.5		
IV. Экологические аспекты (воздействие на окружающую среду) (ЭК)		
ЭК.1 - ЭК.5		
V. Перспективы расширенного использования энерготехнологий (П)		
П.1 - П.4		
VI. Инфраструктура (И)		
И.1 - И.4		

Следующим шагом в работе над матрицей было определение значений весов критериев, т.е. относительной значимости. Для этого сначала были определены значения весов каждой из областей анализа с условием, что сумма их составляет единицу. Затем были определены значения весов критериев по областям, при условии, что сумма весов критериев уже внутри каждой области составляет единицу.

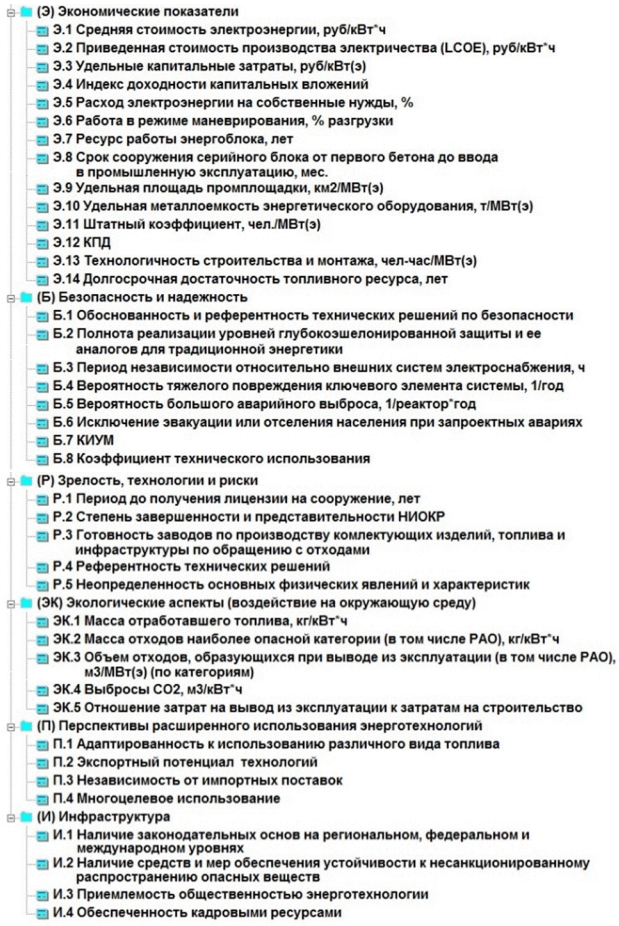

Рис. 1. Структура системы критериев.

Определение значений весов проводилось на основе экспертных оценок, сделанных специалистами организаций-участников работы. При этом сначала проводилось усреднение оценок по каждой организации (т.к. в оценках от каждой организации участвовало по несколько экспертов), а далее результирующие средние оценки по организациям были статистически

обработаны АО «ОКБМ Африкантов» и усреднены между собой, что в результате дало «базовый» набор значений весов критериев и областей.

Соотношение весов областей оценки характеризует расстановку приоритетов в соответствии разными подходами к оценке [4].

Подобный подход к проблеме выбора весов критериев наложил определенные ограничения на выбор метода многокритериальной оценки, в частности, пришлось отказаться от успешно используемого в НИЦ КИ и ГНЦ РФ ФЭИ в задачах нераспространения методов многофакторного анализа, основанных на использовании многокритериальной функции полезности [4-6]. Дело в том, что определение весов при использовании этого метода осуществляется несколько по -другому: сперва формируется список вариантов (альтернатив), между которыми проводится сравнение, затем экспертным путем параметры некоторых рассматриваемых вариантов меняются таким образом, чтобы лицу, принимающему решение, (ЛПР) было бы безразлично, какой из вариантов выбирать. Для набора безразличных альтернатив решается система уравнений, решением которой и является набор весов. Т.е. проблема экспертной оценки заменена так называемой процедурой trade-off (некий своеобразный «торг»).

Это означает, что при смене рассматриваемого набора вариантов, например, при замене реактора БН-1200 на реактор БН-800, а реактора ВВЭР-ТОИ на реактор ВВЭР-1000 весь набор весов надо переопределять заново.

Для того, чтобы избежать подобного некорректного использования метода функций полезности в настоящей работе был использован метод «смещенного идеала» [7,8], который позволяет проводить сопоставление различных вариантов с весами, назначенными извне, как это и было в нашем случае. Описание метода будет приведено ниже.

На рис. 2 показана диаграмма, представляющая два набора весов областей оценки: «базовый» (полученный на основе статистики экспертных оценок организаций-участников, собранной и обработанной АО «ОКБМ Африкантов») и «альтернативный» (полученный на основе простого усреднения экспертных оценок специалистов НИЦ «Курчатовский институт»).

Из диаграммы на рис. 2 видно, что в альтернативном варианте при сохранении безусловного приоритета «экономики» и «безопасности» большее внимание уделяется «инфраструктуре», «перспективам» и «зрелости» технологии.

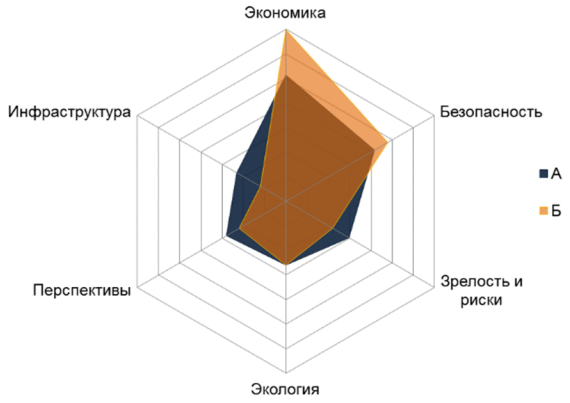

Рис. 2. Базовый (Б) и альтернативный (А) наборы весов областей многокритериального анализа

Некоторые проблемы выбора и обоснования значений критериев

Для заполнения матрицы многокритериального анализа в части значений критериев был проведен информационный обзор приведённых в открытых источниках сведений по следующим энергетическим установкам: РУ БН-1200, РУ ВВЭР-ТОИ, РУ АР-1000, пылеугольный энергоблок на 660 МВт, ПГУ-420. На основе собранной информации были непосредственно приняты значения некоторых критериев, причём, в случае различия данных в нескольких источниках, итоговое значение критерия принималось, основываясь на авторитетности источника, экспертном мнении или новизне информации.

В ряде случаев значения для некоторых критериев, таких как, например, «LCOE» и её составляющие, «средняя себестоимость электроэнергии», «индекс капитальных вложений», «выбросы CO_2», «отходы наиболее опасной категории» и др., были получены расчётным путём.

Значения для критериев с качественной оценкой «лучше–хуже» принимались на основе экспертных оценок коллектива специалистов.

Такой же подход был использован и при оценке некоторых количественных критериев для газовой и угольной технологии. Например, для определения «периода независимости относительно внешних систем электроснабжения» считалось, что углеводородные установки в этом смысле независимы, и значение периода было принято существенно большим, чем для реакторных установок.

Для критериев «вероятность тяжелого повреждения ключевого элемента системы» и «вероятность большого аварийного выброса» значения по углеводородным установкам приняты нулевыми, т.к. при сравнении их с реакторными установками в данных категориях целесообразней учитывать риски от рассматриваемых событий, а они предполагаются более значительными в случаях выхода радиоактивности.

Отдельно следует отметить противоречия, возникшие в связи с применением некоторых критериев и выявленные в процессе выполнения анализа. Например, это относится к критерию «коэффициент использования установленной мощности». Согласно определению, приведённому в ГОСТ 19431-84, КИУМ – это отношение среднеарифметической мощности к установленной мощности электроустановки за установленный интервал времени. Таким образом, КИУМ включает недоиспользование установленной мощности, обусловленное нагрузкой сети, которая зависит от расположения площадки. А т.к. сравниваемые установки приводятся к одной площадке, то, при наличии сравнения по «коэффициенту технического использования», который не учитывает фактора нагрузки сети, нет необходимости использовать сравнение по КИУМ. Помимо этого, как правило, КИУМ для угольных и газовых ТЭС меньше, чем для АЭС из-за работы в разных режимах нагрузки сети.

Ещё одним неоднозначным критерием оценки оказался критерий «Объем отходов, образующихся при выводе из эксплуатации (в том числе РАО)». Вывод АЭС из эксплуатации существенным образом зависит не только от типа выводимого реактора, но и от принятой стратегии вывода из эксплуатации. Количество отходов, особенно отходов наиболее опасной категории, может существенно зависеть от того, принята ли стратегия немедленного или отложенного демонтажа, осуществляется ли вывод из эксплуатации до стадии «зеленой площадки», т.е. с полной реабилитацией территории, либо вывод из эксплуатации осуществляется до стадии «бурой площадки», т.е. площадки с которой удалено ОЯТ и наиболее опасные отходы, однако полной реабилитации территории не производится.

На такой площадке, в соответствие с радиационными нормативами, при определенных обстоятельствах, могут находиться промышленные объекты, но запрещено возведение жилых объектов. Как правило, на таких площадках присутствует защитное ограждение.

Отличительной чертой стратегии с отложенным демонтажем является то, что на первой стадии вывода из эксплуатации производится удаление ОЯТ с территории АЭС, а собственно демонтаж конструкций АЭС откладывается на значительное время, за которое происходит высвечивание облученных конструкций и уровень наведенной активности конструкционных материалов существенно снижается, что делает последующий демонтаж более безопасным.

Первая стадия вывода из эксплуатации, таким образом, практически не отличается от штатных операций, выполняемых на АЭС с помощью штатного оборудования. Неопределенности исходных данных для второй стадии вывода из эксплуатации велики, а вот оценка первой стадии может быть выполнена аналогично критерию «Масса отходов наиболее опасной категории».

Вывод из эксплуатации ТЭС с ПГУ осуществляется достаточно просто, по сравнению с АЭС, поскольку в случае ПГУ в принципе нет облученных материалов, а изношенное оборудование может быть просто заменено на новое, таким образом, вместо вывода из эксплуатации возможна просто реновация ТЭС.

В случае угольной ТЭС реновация такого сорта невозможна, поскольку возможность продолжения эксплуатации угольной ТЭС ограничена емкостью золоотвала (существуют прецеденты прекращения работы ТЭС из-за исчерпанной возможности заполнения золоотвала) [9]. Это означает, что угольная ТЭС может быть оценена по аналогии с критерием «масса отработавшего топлива», поскольку при выводе из эксплуатации придется иметь дело сразу со всем золоотвалом, а не с последней топливной загрузкой, как в случае с АЭС. С другой стороны, на практике дело обстоит совсем не так: утилизация золоотвалов в России практически не производится, поэтому их, условно, можно также рассматривать как объекты с отложенным демонтажем.

Учитывая вышесказанное, в настоящей работе различия по критерию ЭК.3 «Объем отходов, образующихся при выводе из эксплуатации (в том числе РАО)» не учитываются, однако уже сейчас понятно, что, с одной стороны, способ оценки критерия, а возможно и его структуру, необходимо дорабатывать, а с другой стороны само направление доработки не всегда очевидно – в области вывода из эксплуатации объектов ядерной энергетики существует четкое нормативно регулирование, однако вопрос о нормативном регулировании вывода из эксплу-

атации в органической и возобновляемой энергетике остается менее проработанным.

Оценки LCOE [10] выполняются с использованием методики расчёта, утвержденной в Госкорпорации «Росатом» приказом от 14.04.2017 № 1/320-П в ценах и условиях на 01.01.2016 г. Ставка дисконтирования – 4 %. Расчет производится в постоянных ценах без учета инфляционной составляющей.

Данная методика расчета LCOE является модификацией общепринятой методики, разработанной конкретно для экономических условий Российской Федерации:

$$LCOE = \left(\sum_{j=t_0}^{t_1} \frac{КЗ_j}{(1+НД_j)^{j-t_1+0.5}} + \right.$$
$$\left. + \sum_{i=1}^{n} \frac{ОЗ_i * (1-НП) + КЗП_i - A_i * НП}{(1+НД_i)^i} \right) /$$
$$/ \sum_{i=1}^{n} \frac{CI_i * W_{ОТП_i} * (1-НП)}{(1+НД_i)^i}$$

где:

i - календарный год, для которого проводится расчет;

n - суммарная длительность (в годах) календарных периодов эксплуатации, модернизации, промышленной эксплуатации после модернизации, подготовки и вывода из эксплуатации АЭС;

t_0 - год начала реализации проекта;

t_1 - год ввода объекта в эксплуатацию;

$КЗ_j$ - капитальные затраты конкретного года;

$КЗП_i$ – прочие затраты капитального характера (если таковые имеются) в -м году;

$ОЗ_i$ – операционные затраты за период;

A_i – амортизация;

НП – ставка налога на прибыль;

$W_{ОТП_i}$ - прогнозируемый полезный отпуск электрической энергии в соответствующем году;

CI_i - кумулятивный индекс потребительских цен в i-м году, отражающий рост совокупной цены на электроэнергию (с учетом мощности). Изменение индекса потребительских цен определяется в соответствии с прогнозом Министерства экономического развития Российской Федерации;

$НД_i$ - норма доходности инвестированного капитала в i-м году, рассчитанная с учетом уровня доходности долгосрочных государственных обязательств. В случае вычисления номинального показателя удельной приведенной стоимости производства единицы электрической энергии (1 кВт·ч) энергоблока АЭС используется НД, в номинальном выражении, в случае вычисления реального показателя - НД в реальном выражении.

Особенностью расчета LCOE для ПГУ-420 и К-660 является учет в операционных затратах платы за выбросы CO_2.

В процессе принятия решения о выборе типа энергоустановки для строительства в определённом месте следует со всей ответственностью учитывать экологические аспекты используемой технологии, в том числе, включая полный жизненный цикл конкретного вида энергетики.

В настоящей работе в качестве критериев оценки экологических аспектов рассматриваемых технологий и их воздействия на окружающую среду рассмотрены удельная масса отработавшего топлива (для газовой технологии ПГУ, в предположении об отсутствии недожога, принята нулевая масса отработавшего топлива), отходы, выбросы парниковых газов, а также затраты на вывод из эксплуатации. Но необходимо отметить, что некоторые критерии, использованные для оценки в других областях, также характеризуют и воздействие на окружающую среду. Таковыми, например, являются: КПД и удельная площадь промплощадки, применяемые в качестве экономических показателей.

Для оценки выбросов парниковых газов при сравнении по рассматриваемым установкам приняты данные исследования [9, 11-14], проведённого для полного жизненного цикла различных энергетических технологий (атомная, угольная, газовая, и др.). Принятые значения выброса (в г CO_2экв.) для атомных установок составляют 10 г/кВт·ч(э), для угольной – 1000 г/кВт·ч(э), а для газовой – 560 г/кВт·ч(э).

Кроме того, основываясь на данных по удельному образованию CO_2 при сжигании различных видов топлива, была проведена дополнительная оценка для угольной и газовой технологии. По данным [11-14] на 1 кВт·ч при сжигании природного газа образуется 0,2 кг CO_2, а на 1 кВт·ч при сжигании каменного угля – 0,33 кг CO_2.

Согласно этой оценке по угольной технологии для 4-х энергоблоков К-660-300 с КПД ТЭС, равным 47 %, и КИУМ, равным 0,8, при годовой выработке электроэнергии 18,5 млрд кВт·ч, годовой выброс CO_2 составляет 13 млн т (702 г/кВт·ч(э)), при этом в золошлакоотвал ТЭС будет поставляться 1,52 млн т/год золошлаковых отходов.

По газовой технологии для 6-ти энергоблоков ПГУ-420 с КПД ТЭС равным 59 % и КИУМ

равным 0,8 при годовой выработке электроэнергии 17,7 млрд кВт·ч, годовой выброс CO_2 составляет 6 млн т (339 г/кВт·ч(э)).

Данные, полученные из дополнительной оценки выбросов по угольной и газовой технологиям, были приняты для определения величины налога на выбросы в экономических расчётах (в т. ч. LCOE).

Критерий «масса отходов наиболее опасной категории» также смотрится достаточно неоднозначно при сравнении АЭС и углеводородных ТЭС. Основную массу отходов при выводе угольной ТЭС из эксплуатации составляют отходы, накопленные в золоотвале за весь срок службы станции. Для АЭС этой категорией могут являться, например, высокоактивные отходы (ВАО), тогда как для пылеугольной ТЭС отходом являются золы и шлаки от сжигания угля, содержащие природные радионуклиды (уран, торий. Но по факту величина удельной активности ВАО (а также САО и НАО) существенно выше, чем для ЕРН в золошлаках. С другой стороны, золошлаки содержат другие токсичные соединения (серы, азота, ртути и пр.), при этом свободно хранятся под открытым небом на золошлакоотвалах ТЭС, подвергаясь воздействию атмосферных осадков и ветра, что способствует их неконтролируемому распространению на прилегающие территории (золоотвалы «пылят») за пределы санитарно-защитной зоны. На АЭС контроль перемещения радиоактивных отходов существенно строже. Таким образом, при имеющихся качественных отличиях целесообразен более глубокий анализ при сопоставлении отходов АЭС и ТЭС, но ввиду сложности и неоднозначности вопроса это требует проведения дополнительных исследований.

Уголь (топливо ТЭС) всегда содержит природные радиоактивные вещества уранового и актиноуранового рядов (^{238}U и продукты его распада: ^{234}U, ^{226}Ra, ^{222}Rn, ^{210}Pb, ^{210}Po и т.д.; ^{235}U и продукты его распада ^{219}Rn и т.д.), ториевого ряда (^{232}Th и продукты его распада ^{220}Rn, ^{216}Po), а также долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K. К сожалению, существует сильная неопределенность измерений содержания радиоактивных веществ в угле почти по всем изотопам.

Расчетная оценка содержания радиоактивных элементов в золошлаковых отходах была сделана в предположении, что эффективность электрофильтров составит 99,9%.

В качестве исходных данных по содержанию урана и тория были приняты данные института угля и углехимии СО РАН, использованные в [9]. Содержание тория в угле было принято в расчетах 4,198 г/т, а содержание урана 4,125 г/т.

С учетом теплоты сгорания кузнецкого угля [9] годовой расход угля можно оценить в 5,6 млн тонн, что в пересчете на годовое накопление тория и урана позволяет оценить накапливаемые количества тория в золошлаковых отвалах как 23,5 т/год, а урана- 23,1 т/год. Другими словами, за 40 лет (срок службы ТЭС) в золоотвалах может накопиться 940 тонн тория и 924 тонн урана (и продуктов их распада).

Поскольку эта категория отходов наиболее близка для сопоставления с отходами атомной энергетики (условно ее можно рассматривать как РАО), то по сравнению с другими отходами (окислы азота, окислы серы, примеси тяжелых металлов, микрочастицы пыли), было принято решение считать их наиболее опасными. Поэтому в матрицу для многокритериального анализа были включены параметры именно этой категории.

Для АЭС значения критерия «масса отходов наиболее опасной категории» определялись на основе данных по количеству ежегодно образующихся ТРО.

После формирования матрицы критериев были проведены расчеты при помощи метода смещенного идеала.

Расчеты в обеспечение многокритериального анализа

3.1. Метод проведения многокритериального анализа

Метод смещенного идеала является одним из распространенных методов решения многокритериальных задач, предназначенным для выделения одного или подмножества объектов, являющихся наиболее предпочтительными [7, 8].

В общем виде метод является итерационным, т.е. на каждой итерации могут исключаться объекты, не претендующие на наибольшее предпочтение.

Характерной особенностью метода является формирование так называемого «идеального объекта», как правило, отсутствующего в реальной жизни, но с точки зрения формализации метода служащего своего рода целью, к которой хотелось бы стремиться.

Как правило, такой идеал не достижим, однако его формулировка помогает ЛПР лучше понять и обозначить свои цели.

Алгоритм метода, в общем случае, выглядит следующим образом.

Пусть исходное множество объектов включает n объектов. Все критерии k_j (j=1,…,m), характеризующие объекты, измеряются по шкале интервалов или отношений.

На первом этапе формируется идеальный объект $\{k_1^+, \dots, k_m^+\}$, где k_j^+ - максимальное по предпочтению значение критерия среди всех объектов, т.е. $k_j^+ = max\, k_j^i$, если предпочтение объекта возрастает с возрастанием значения критерия или, наоборот, $k_j^+ = min\, k_j^i$, если предпочтение объекта возрастает при понижении значения критерия. На этом же этапе формируется «худший объект» $\{k_1^-, \dots, k_m^-\}$ из наименее предпочтительных значений.

На втором этапе осуществляется переход от физических единиц измерения к относительным в соответствии с выражением:

$$d_j^i = \left(k_j^i - k_j^-\right) \Big/ \left(k_j^+ - k_j^-\right)$$

В относительных единицах все критерии будут изменяться в интервале [0,1], причем, чем больше (ближе к 1) d_j^i, тем ближе объект к «идеальному», т.е. все d_j^i у идеального объекта равны единице, а у «худшего» равны нулю.

На третьем этапе метода ЛПР, исходя из своих суждений о важности критериев, задает их веса W_j $(j = 1, \dots, m)$. Сумма весов не обязательно должна быть равна единице.

На четвертом этапе проводится выявление объектов, не претендующих на предпочтительный, для этого вычисляют расстояние от рассматриваемых объектов до «худшего», используя выражение:

$$L_i^p = \left[\sum_{j=1}^{m} \left(W_j \left(d_j^i\right)^p\right)\right]^{1/p}$$

Используя различные значения параметра p, можно получить различные метрики: при p=1 получаем аддитивный оператор, при p=2 – евклидову метрику, при p=∞ получаем: $L_i = max\left[W d_j^i\right]$.

Чем больше значение L_i^p, тем дальше объект от худшего и ближе к идеальному.

На следующем, пятом, этапе, задавая различные значения параметра p, ЛПР определяет различные метрики для сравнения с идеальным объектом, в результате для каждой из метрик все объекты упорядочиваются по степени близости к идеалу.

В общем случае, считается, что расчеты нужно выполнять для всех метрик, однако, как правило, порядок объектов по расстоянию до идеального изменяется только для значений p равных 1, 2, 3, 4, 5, а затем он сохраняется. Поэтому расчеты выполняются для пяти метрик, затем выполняется проверочный расчет при большом значении p, например, 15. Считается, что последовательное увеличение степени p позволяет сфокусировать анализ на параметрах, вносящих наибольший вклад в итоговое значение метрики. При p=∞ выделяется единственный критерий с максимальным вкладом.

Дополнительной целью многокритериального анализа было определение критериев (параметров) БН-1200, улучшение которых может повысить его конкурентоспособность. С этой целью был выполнен анализ чувствительности.

3.2. Методика анализа чувствительности

Для систематического анализа неопределенности и чувствительности результатов расчетов использовалось программное средство SUSA 4.0 (Software for Uncertainty and Sensitivity Analyses) [15], в котором реализован метод GRS. Анализ неопределенности и чувствительности основан на выполнении многократных оценок с применением метода смещенного идеала со случайно выбранными наборами значений входных параметров. С использованием результатов этих оценок также определяется влияние входных данных на эту неопределенность. Метод GRS не имеет ограничений по количеству рассматриваемых неопределенных параметров.

Анализ включает в себя пять этапов:

- выбор типа распределения для каждой переменной величины (входного параметра).
- формирование наборов исходных данных, генерируемых в соответствии с распределениями, выбранными на первом этапе.
- расчет наборов выходных значений методом смещенного идеала со всеми сгенерированными наборами значений исходных данных.
- анализ неопределенности результатов, которая характеризуется с помощью математического ожидания и среднеквадратического отклонения.
- далее результаты проведенных расчетов используются в качестве базы для анализа чувствительности.

На рисунке 3 показана принципиальная схема используемого подхода.

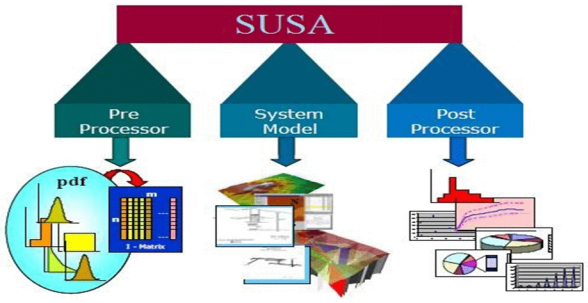

Рис.3. Принципиальная схема используемого подхода

Целью анализа неопределенности является определение типа распределения выходных величин и вычисление параметров распределения: математического ожидания, среднеквадратического отклонения.

Цель анализа чувствительности состоит в том, чтобы оценить соотношения между неопределенностью входных переменных, используемых в анализе, и неопределённостью зависимых переменных.

Анализ неопределенности обычно предшествует анализу чувствительности; если неопределенность зависимой переменной находится в пределах приемлемого диапазона, то имеет смысл провести анализ чувствительности.

Когда анализ по методу Монте-Карло выполнен, строится график рассеяния расчетных результатов, как функции начальных данных.

Как только построен график рассеяния, он исследуется с использованием различных методик для определения чувствительности выходных данных расчетной модели к входным переменным. Определение чувствительности проводится с помощью регрессионного анализа.

3.3. Результаты расчетов

Целью расчетных исследований в рамках многокритериального анализа была сравнительная оценка конкурентоспособности реакторной установки БН-1200 с реакторными установками: АР-1000 и ВВЭР-ТОИ, а также с установками на органическом топливе: угольной К-660-300 и газовой ПГУ-420.

Исходными данными для проведения расчёта являются: базовый набор весов критериев и набор значений критериев, соответствующий текущему на момент проведения анализа состоянию разработки РУ БН-1200 (далее условно именуемый как «прагматический» набор значений критериев).

Результаты прямого однократного расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2. *Результаты ранжирования в зависимости от показателя метрики*

P	Ранг				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	ПГУ-420	ВВЭР-ТОИ	АР-1000	БН-1200	К-660-300
2	ПГУ-420	ВВЭР-ТОИ	АР-1000	БН-1200	К-660-300
3	ВВЭР-ТОИ	ПГУ-420	БН-1200	АР-1000	К-660-300
5	ВВЭР-ТОИ	БН-1200	АР-1000	ПГУ-420	К-660-300
8	ВВЭР-ТОИ	БН-1200	АР-1000	ПГУ-420	К-660-300
10	ВВЭР-ТОИ	БН-1200	АР-1000	ПГУ-420	К-660-300
15	ВВЭР-ТОИ	БН-1200	АР-1000	ПГУ-420	К-660-300

Результаты многокритериального анализа говорят о том, что при значении параметра p=1 и p=2 вариант ПГУ-420 доминирует над всеми остальные вариантами, включая занимающий второе место ВВЭР-ТОИ, который выходит на первую позицию только при значении параметра p=3 (чем выше показатель метрики, тем больше влияние преобладающих критериев).

Рисунки 4-7 иллюстрируют процесс фокусировки на критериях, вносящих максимальный вклад в значение итоговой оценки, путем повышения степени метрики. Показаны соответствующие вклады для оценок БН-1200 и ВВЭР-ТОИ.

Видно, что при росте степени p в зависимости от типа установки локализуются разные параметры, в данном случае критерий «Средняя стоимость электроэнергии» для БН-1200 и критерий «Приведенная стоимость производства электричества» для ВВЭР-ТОИ.

В качестве начального шага анализа неопределенности и чувствительности результатов многокритериального анализа был проведен систематический анализ неопределенности и чувствительности результатов расчетов самих экономических параметров для АЭС с РУ БН-1200 и ВВЭР-ТОИ, используемых в качестве критериев в матрице.

Результаты, приведенные на рисунках 8 – 11, показывают, что в пределах рассмотренных неопределенностей значений критериев для БН-1200 имеется отличная от нуля вероятность изменения порядка ранжирования вариантов.

По итогам анализа была предпринята попытка выделить те критерии, улучшение которых позволяет повысить оценку реактора БН-1200. В переходе в практическую плоскость это означает формулирование требований, которые следует учесть при доработке проекта, чтобы повысить его конкурентоспособность.

Следует отметить, что повышение значений некоторых критериев обусловлено вполне естественными причинами. Так значения критериев Р.2 «Степень завершенности и представительности НИОКР» и Р.3 «Готовность заводов по производству комплектующих изделий, топлива и инфраструктуры по обращению с отходами» могут вырасти по мере работы над проектом установки и при развитии инфраструктуры. Поэтому первым шагом в анализе чувствительности было повышение оценок по этим критериям до максимальных, что позволяет оценить технологию БН-1200 на стадии её готовности к использованию, которая неизбежным образом наступит по завершению работ.

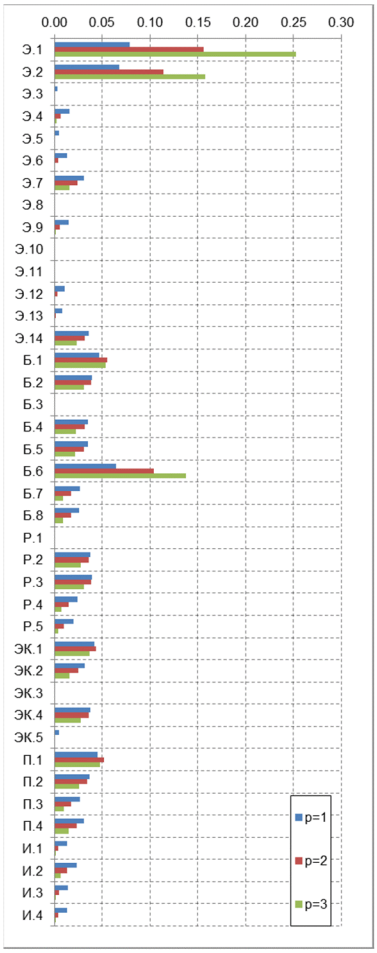

Рис. 4. Иллюстрация процесса фокусировки на критериях, определяющих оценку БН-1200, диапазон низких значений степени p метрики Lp.

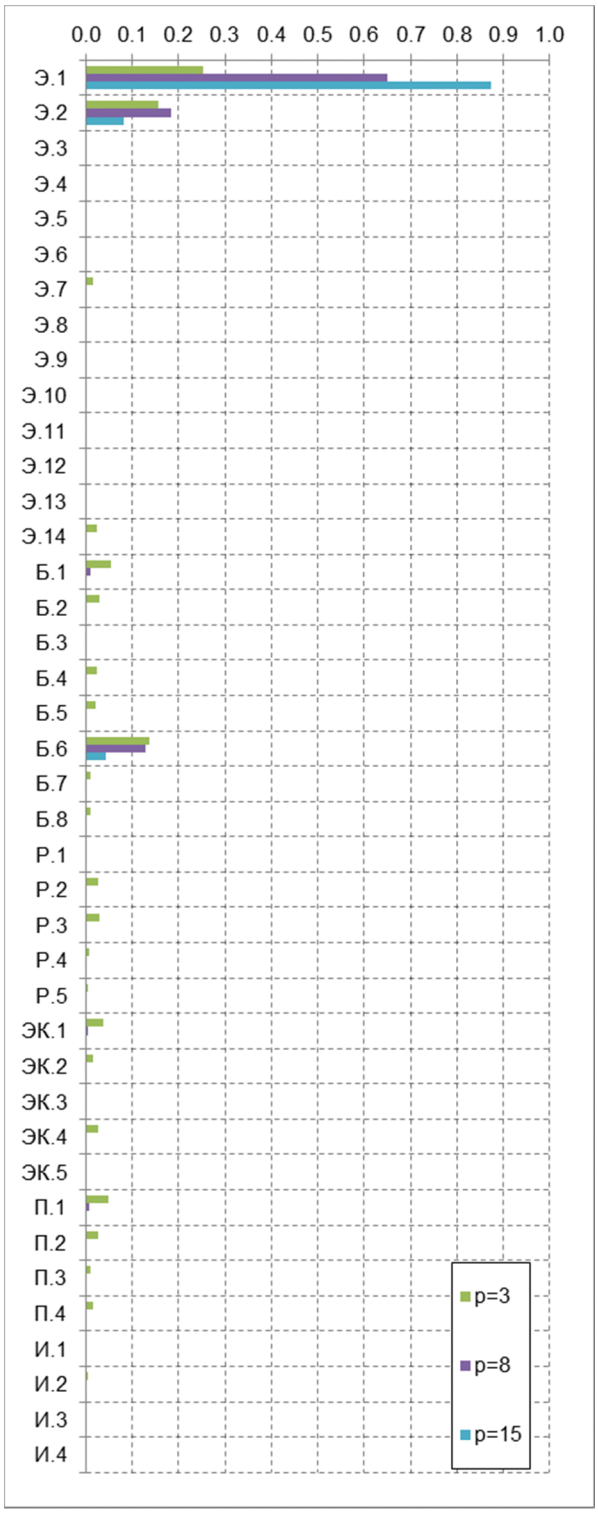

Рис. 5. Иллюстрация процесса фокусировки на критериях, определяющих оценку БН-1200, диапазон высоких значений степени p метрики Lp.

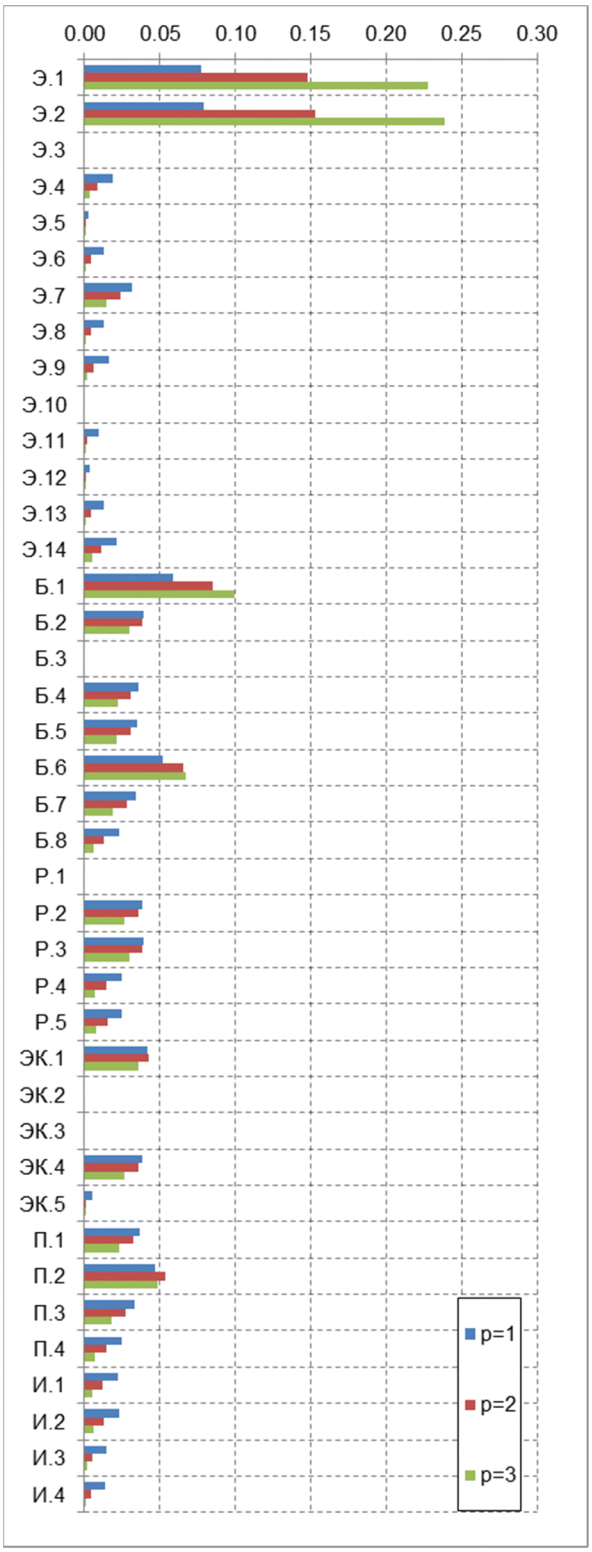

Рис. 6. Иллюстрация процесса фокусировки на критериях, определяющих оценку ВВЭР-ТОИ, в диапазоне низких значений степени *p* метрики *Lp*.

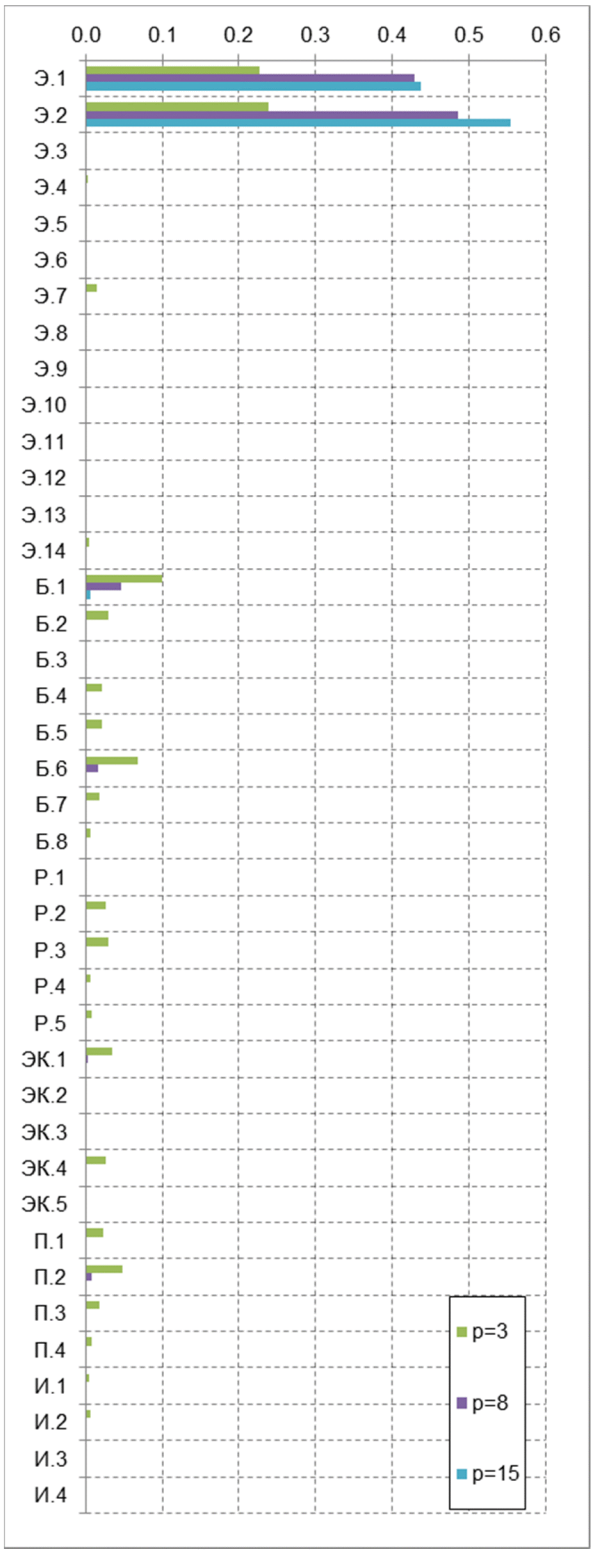

Рис. 7. Иллюстрация процесса фокусировки на критериях, определяющих оценку ВВЭР-ТОИ, в диапазоне высоких значений степени *p* метрики *Lp*.

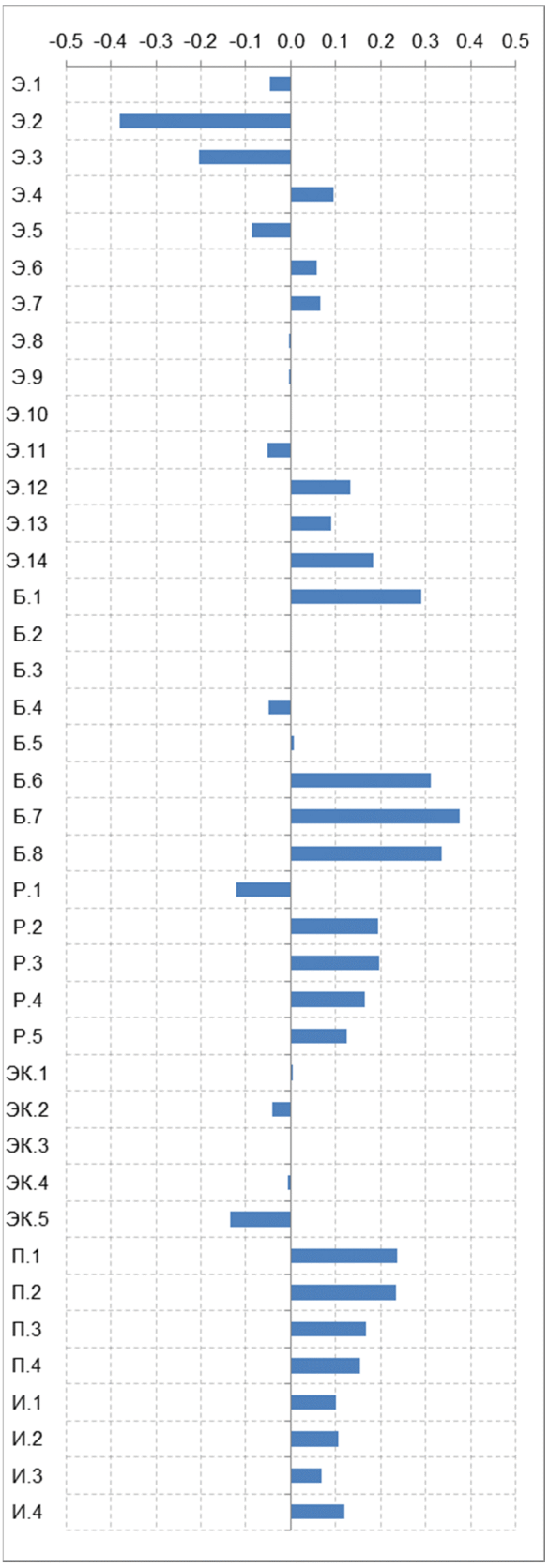

Рис. 8. Чувствительность конечной оценки для БН-1200 к значениям критериев для БН-1200 при p=1.

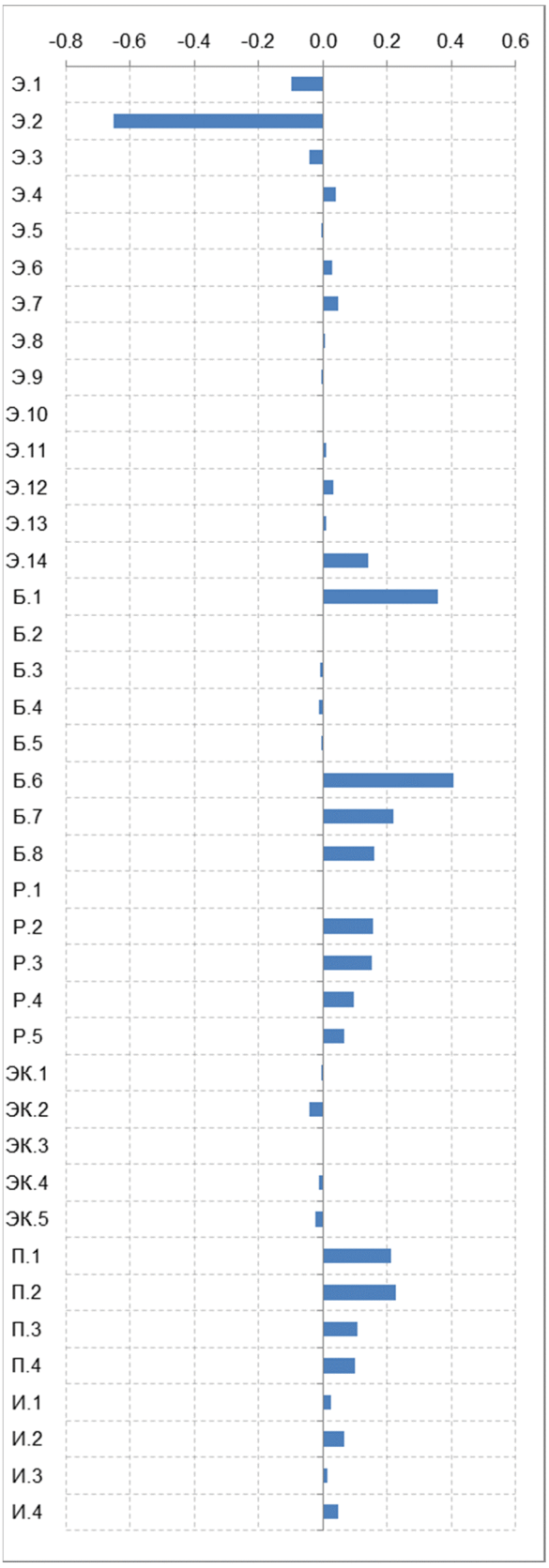

Рис. 9. Чувствительность конечной оценки для БН-1200 к значениям критериев для БН-1200 при p=2.

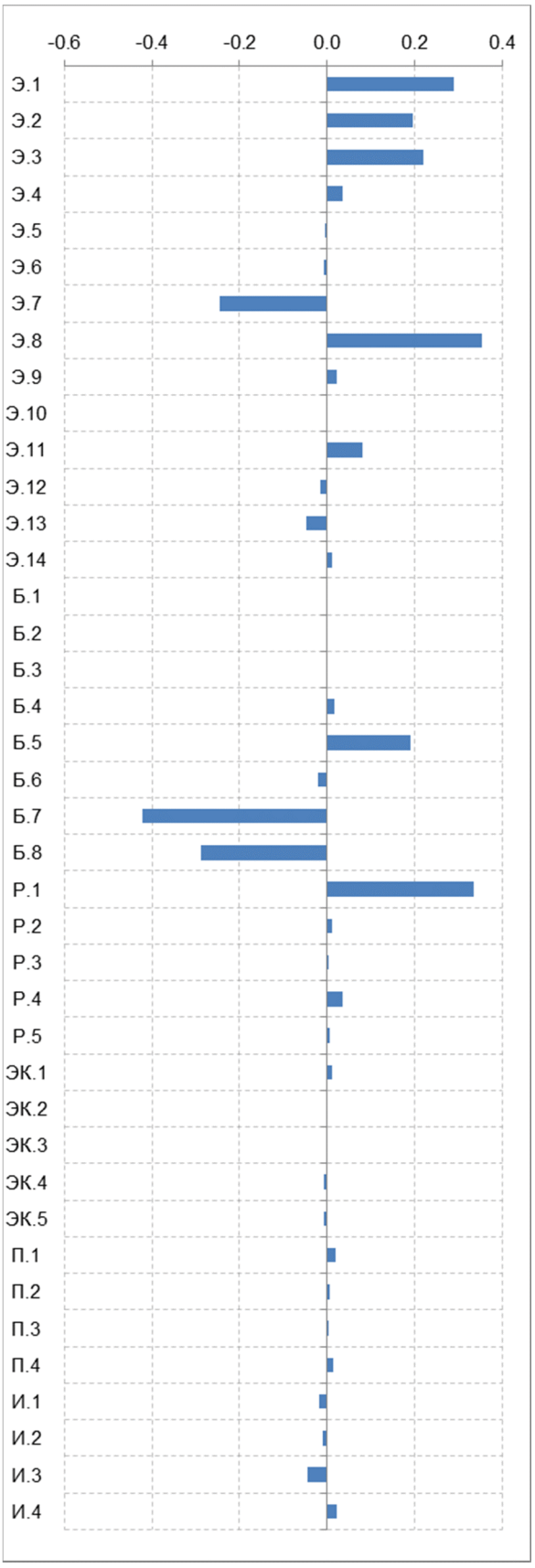

Рис. 10. Чувствительность конечной оценки для ВВЭР-ТОИ к значениям критериев для БН-1200 при p=1.

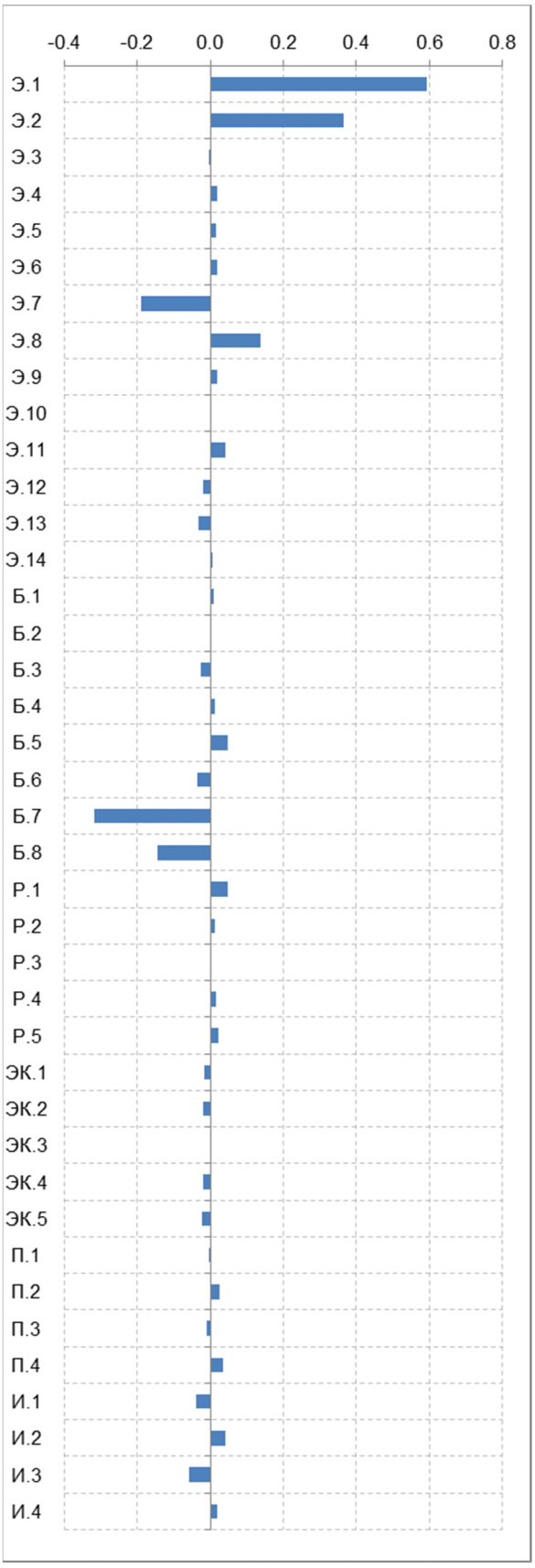

Рис. 11. Чувствительность конечной оценки для ВВЭР-ТОИ к значениям критериев для БН-1200 при p=2.

Следующим очевидным критерием, значение которого может быть повышено, является критерий Р.4 «Референтность технических решений». Довольно низкая оценка по этому критерию была обусловлена тем, что в России до сих пор ни одна активная зона реактора на быстрых нейтронах коммерческого диапазона мощности никогда не была полностью загружена МОКС-топливом. После перевода БН-800 на полную загрузку МОКС-топливом опыт эксплуатации реактора на быстрых нейтронах с полной загрузкой МОКС-топливом появится, и возрастание оценки по этому критерию будет выглядеть логичным, если этот опыт будет учтен в проекте БН-1200. Однако такое возрастание не может быть максимальным, поскольку нереферентными техническими решениями остаются большое уплощение активной зоны с органами СУЗ из высокообогащенного карбида бора и большой размер ТВС под ключ (в российских быстрых реакторах подобный размер не применялся). Большой размер ТВС под ключ имел французский реактор на быстрых нейтронах СУПЕРФЕНИКС, однако он проработал непродолжительное время и, по этой и другим причинам, скорее всего, не может считаться обеспечивающим референтность для БН-1200.

Принятая ранее оценка критерия П.2 «Экспортный потенциал» для реактора БН-1200 ниже, чем оценка ВВЭР-ТОИ и АР-1000, что обусловлено рядом причин.

Во-первых, в отличие от БН-1200, на строительство реакторов ВВЭР-ТОИ уже подписано значительное количество контрактов или предварительных соглашений, а АР-1000 уже продан в Китай, что подтверждает их высокий экспортный потенциал. Во-вторых, и ВВЭР-ТОИ, и АР-1000 относятся к легководным реакторам, осуществление гарантий МАГАТЭ, на которых является хорошо отработанной процедурой, еще точнее, возможность осуществлять гарантии МАГАТЭ учитывается проектом установки (принцип safeguards by design), что на БН-1200 (на момент проведения многокритериального анализа) еще предстоит реализовать.

Потенциал К-660-300 оказывается несколько ниже, поскольку это новейший угольный энергоблок, на который еще не успели заключить контрактов, однако оборудование для угольных ТЭС предыдущего поколения успешно продается, например, в страны Латинской Америки или СНГ. В настоящий момент у нас нет данных, предполагается ли на ТЭС с К-660-300 обогащение угля, но на энергоблоках предыдущего поколения такой процедуры не было, поэтому оборудование такого сорта можно продать далеко не во все страны Евросоюза (например, в Германии обогащение угля – обязательная процедура, при этом она существенно сказывается на себестоимости электроэнергии). Что касается ПГУ-420, то его не самая высокая оценка по этому критерию обусловлена тем обстоятельством, что ПГУ зарубежного производства (ПГУ-420 на 70% также оснащается импортным оборудованием) имеют более высокий КПД и экспортный потенциал выше, чем ПГУ-420.

Экспортный потенциал БН-1200 возрастет при выполнении двух условий: во-первых при наличии спроса, что возможно в странах, ориентирующихся на замыкание топливного цикла, во-вторых, при обеспечении в проекте установки возможности осуществлять гарантии МАГАТЭ.

В результате анализа чувствительности был сформирован так называемый «оптимистический набор» значений критериев, соответствующий случаю доработки проекта, учитывающей результаты многокритериального анализа (Рис. 12).

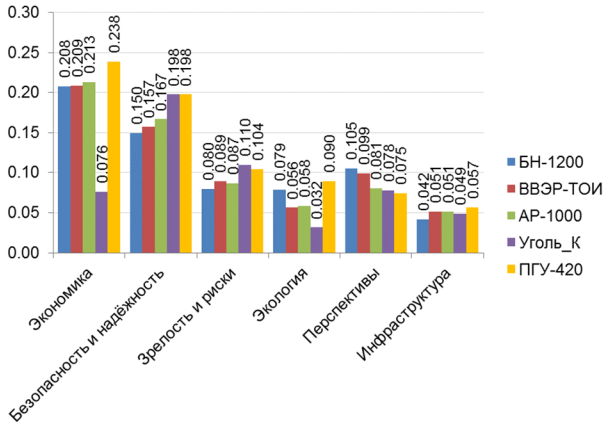

Рис.12. Сводные показатели по областям оценки для базового набора весов и «оптимистического» набора значений критериев при p=1.

Заключение

В ходе работы была предпринята попытка применения многокритериального анализа к оценке конкурентоспособности электростанций с ядерным и неядерным энергоисточником на основе использования метода смещенного идеала в сочетании с методами анализа чувствительности.

Сформирована матрица многокритериального анализа, в которой критерии разделены на шесть областей оценки. Каждой области и кри-

терию назначены весовые коэффициенты. Отмечена возможность выбора различных подходов к назначению весов областей, которая может повлиять на результаты анализа.

Систематизирована информация об объектах многокритериального анализа: АЭС с двумя блоками БН-1200, АЭС с двумя блоками ВВЭР-ТОИ, АЭС с четырьмя блоками АР-1000, ТЭС с четырьмя пылеугольными блоками по 660 МВт(э), ТЭС с шестью ПГУ 420, условно привязываемых к одной площадке. На основе данной информации, проведённых расчётов и экспертных оценок был определен предварительный набор значений критериев.

В качестве начального шага анализа результатов исследований был проведен систематический анализ неопределенности и чувствительности экономических параметров для АЭС с РУ БН-1200 и ВВЭР-ТОИ, используемых в качестве критериев в матрице. После этого решалась локальная задача анализа неопределенности и чувствительности итоговых оценок к значениям критериев для БН 1200, при постоянных значениях критериев для других энерготехнологий.

По итогам анализа определены критерии, улучшение которых позволяет повысить оценку реактора БН-1200. На основании этого сформулированы требования, которые следует учесть при доработке проекта, чтобы повысить его конкурентоспособность в сравнении с другими энерготехнологиями. Путем формирования «оптимистического» варианта матрицы количественно оценен потенциал такого повышения по сравнению с базовым вариантом. Таким образом, в работе приведены промежуточные результаты применения многокритериального анализа, и определены основные пути развития многокритериальных подходов, в том числе в направлении снижения роли субъективных факторов в итоговой оценке, а также повышения роли объективных факторов, прежде всего за счет объединения баз данных различных участников и анализа их полноты.

Список литературы

1. Дж. Кларк. Международные гарантии: точка зрения промышленности / Дж. Кларк. // Бюллетень МАГАТЭ, ежеквартальный журнал международного агентства по атомной энергии, том 38, №4, Вена, Австрия, 1996, с.25-28.
2. В.А. Невиница. Об оценке эксплуатационной составляющей на применение гарантий МАГАТЭ в сценариях утилизации плутония в ядерном топливном цикле / В.А. Невиница, Г.М. Пшакин, Л.П. Пупко, Л.Н. Решетникова, В.И. Усанов. // Препринт ФЭИ-2758, Обнинск, 1999, 12с.
3. Алексеев П.Н. Развитие физико-технических решений по проекту БН-1200 в контексте повышения конкурентоспособности технологии БН / Алексеев П.Н., Баланин А.Л., Декусар В.М., Егоров А.Ф., Клинов Д.А., Коробейников В.В., Марова Е.В., Маслов А.М., Невиница В.А., Староверов А.И., Фомиченко П.А., Шепелев С.Ф., Широков А.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, выпуск 2, 2018, стр.71-83.
4. Н.Н. Пономарев-Степной. Методы принятия решений в задачах оценки альтернативных сценариев утилизации плутония / Н.Н. Пономарев-Степной, Н.Е. Кухаркин. П.Н. Алексеев, В.В. Жигульский, В.А. Невиница, В.А. Стукалов, П.А. Фомиченко // Препринт РНЦ КИ ИАЭ-6384/3, Москва 2005, 23с.
5. J. Dyer. «Evaluation of Alternatives for the Disposition of Surplus Weapon-Usable Plutonium». / J. Dyer, T. Edmunds, J. Butler, J. Jia. ANRCP-1997-1, Amarillo, Texas, USA, 1997.
6. V.I. Oussanov. «MOX Fuel Non-proliferation Analysis for the Reactor Alternatives of the Ex-weapons Plutonium Utilization in Russia» / V.I. Oussanov, A.N. Chebeskov, V.A. Nevinitsa, B.B. Tikhomirov // Radioactive Waste Management and Environment Remediation – ASME 1999.
7. Е.А. Елтаренко. Методы оценки и выбора инженерных и управленческих решений. / Е.А. Елтаренко. Москва, МИФИ, 1987, 54с. // Учебное пособие.
8. Е.А. Елтаренко. Оценка и выбор решений по многим критериям / Е.А. Елтаренко // Москва, МИФИ, 1995, 111с. Учебное пособие.
9. Г.П. Сидорова. Радиоактивность углей и золошлаковых отходов угольных электростанций / Г.П. Сидорова. Д.А. Крылов // Монография. Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2016. – 237 с.:
10. Е.В. Марова. Результаты оценки соответствия проекта БН 1200 требованиям Generation IV и INPRO / Е.В. Марова, С.Ф. Шепелев, Ю.М. Ашурко, В.М. Декусар, В.В. Коробейников, Б.Б. Тихомиров // IAEA CN 245 399, международная конференция FR-17, г. Екатеринбург, 2017.:
11 Ольховский Г.Г. Проблемы охраны воздушного бассейна от воздействия тепловых электростанций и их решения / Ольховский Г.Г., Тумановский А.Г и др. // Известия академии наук. Энергетика. №5. 1997.
12 D. Weisser. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies / D. Weisser. // Energy 32 (2007) 1543–1559
13 К. Альтфельд. «Газпром» и «Ругаз АГ» – партнеры в области экологии. Экология в газовой промышленности. Приложение к журн. Газовая промышленность. 1998. С. 13-15.

14 Т. Аймермахер. Природный газ и климат – проблема потерь метана. / Т. Аймермахер (Ругаз АГ). // Сборник материалов докладов второго международного экологического семинара ОАО «Газпром» и фирмы "Ругаз АГ". (27-29 октября 1997 г. в г. Н. Новгород). М.: ИРЦ Газпром, 1998.
15 SUSA Version 4.0. User's Guide and Tutorial. GRS-P-5, Rev.1. January 2015.

References

1. International Safeguards: Industrilal view. J.Clark. IAEA Bulletin, v38, №4, Vienna, Austria, 1996, p.25-28 (in Russian).
2. Assessment of Operational Cost of IAEA Safeguards Implementation under Plutonium Utilization Scenarios. V.A. Nevinitsa, G.M. Phakin, L.P. Pupko, L.N. Reshetnikova, V.I. Oussanov // Preprint IPPE-2758, Obninsk, 1999, 12p.
3. Development of BN-1200 physical and technical design solutions aimed at improvement of SFR technology competitivness. PHYSICAL AND TECHNICAL DESIGN SOLUTIONS AIMED AT IMPROVEMENT OF SFR TECHNOLOGY COMPETITIVENESS. Alekseev P.N., Balanin A.L., Dekusar V.M., Egorov A.F., Klinov D.A., Korobeynikov V.V., Marova E.V., Maslov A.M., Nevinitsa V.A., Staroverov A.I.,Fomichenko P.A., Shepelev S.F., Shirokov A.V.. VANT. Nuclear Reactor Constants, vol 2, 2018, pp.71-83 (in Russian).
4. N.N. Ponomarev-Stepnoi, N.E. KukharkinP.N. Alekseev, V.V. Zhigulsky, V.A. Nevinitsa, V.A. Stukalov, P.A. Fomichenko. Assessments of Ex-weapon Plutonium Utilization Alternative Scenarios with Decision Making Methods. Preprint RRCKI IAE-6384/3, Moscow, 2005, 23p., (in Russian).
5. J. Dyer, T. Edmunds, J. Butler, J. Jia. «Evaluation of Alternatives for the Disposition of Surplus Weapon-Usable Plutonium» ANRCP-1997-1, Amarillo, Texas, USA, 1997.
6. V.I. Oussanov, A.N. Chebeskov, V.A. Nevinitsa, B.B. Tikhomirov. «MOX Fuel Non-proliferation Analysis for the Reactor Alternatives of the Ex-weapons Plutonium Utilization in Russia», Radioactive Waste Management and Environment Remediation – ASME 1999.
7. E.A. Eltarenko. Methods of assessments and choise of engineering and control decisions. Moscow, MEPHI, 1987, 54p.
8. E.A. Eltarenko. Multicritarial Asessments and Decision Making. Moscow, MEPHI, 1995, 111p.
9. G.P. Sidorova, D.A. Krylov. Radioactivity of Coals and Ashes and Slages of Coal Power Plants. TRANS-Baikal University. – Chita: 2016. – 237 p.:
10. Marova E.V., Shepelev S.F., Ashurko Yu.M. et al. Rezul'taty otsenki sootvetstviya proekta BN-1200 trebovaniyam GENERATION IV & INPRO [Results of the BN-1200 project conformity assessment to the requirements of GENERATION IV and INPRO]. Proc. Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). Yekaterinburg, 2017.
11 Olhovsky G.G. Tumanovsky A.G. et.al. Problems of Prevention on Thermal Pollution of air basin and Ways of Decision. Academy of Science Communication. Power Engineering. №5. 1997.
12 D. Weisser. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies, Energy 32 (2007) 1543–1559.
13 K. Altfeld «GASPROM» & «RURGAS AG» – partners in the field of Ecology. Ecology in Gas Industry. Addition to Gas Industry 1998. pp 13-15.
14 T. Airmermacher (RURGAS AG). Natural Gas and Climate – Problem of Methane leakages Proceedings of 2-nd International Ecological Seminar JSC "GASPROM"&"RURGAS AG". (October 27-29 1997, N. Novgorod). Moscow: GASPROM, 1998.
15 SUSA Version 4.0. User's Guide and Tutorial. GRS-P-5, Rev.1. January 2015.

УДК 621.039.56

Оптимизация распределения нагрузки в сети электроснабжения с перетоками и потерями мощности

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

Статья поступила 15.10.2018 г.; после доработки 17.10.2018 г.

Аннотация

Существующие модели решения задач оптимизации распределения нагрузки в сетях электроснабжения являются детерминированными, не учитывающими перетоки по сети и дифференциацию потерь мощности. В статье предложена модифицированная задачи линейного программирования для случая использования потребителей в качестве вторичных поставщиков с учетом потерь мощности. Создан алгоритм решения задачи на основе классических методов линейного программирования.

Ключевые слова: модель, линейное программирование, модификация, алгоритм, электроснабжение.

Optimization of partition of load in the net of power supply with nondeterministic and losses of power

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

Received 15.10.2018 y.; received in final form 17.10.2018 y.

Abstract

The existent models of decision of tasks of optimization of partition of load in the nets of power supply are determined, not taking into account nondeterministic for netks and differentiation of losses of power. In the article offered modified tasks of the linear programming for the case of the use of users as the second suppliers without losses of power. The algorithm of construction is created and simultaneous decisions of task on the basis of classic methods of the linear programming.

Keywords: model, linear programming, modification, algorithm, power supply.

Введение

Согласно концепции Smart Grid будущая сеть не будет иметь иерархическую структуру, и крупные потребители будут в ней перемешаны с большим количеством относительно маломощных источников энергии и единичных мощных станций, регуляторов напряжения, компенсаторов реактивной мощности и т.д. Это будет сложная, неструктурированная, разветвленная сеть.

Перетоки мощности по такой сети не будут строго детерминированными. Такая сложная сеть (которую даже сравнивают с сетью Интернет) должна иметь мощную управляющую систему, согласовывающую между собой работу всех этих многочисленных компонентов сети.

Главная цель оптимизации распределения нагрузки (Economic Dispatch или ED) состоит в минимизации эксплуатационных расходов в зависимости от спроса, т.е. в оптимальном распределении нагрузки между имеющимися генерирующими источниками [1-3].

Одна из основных сложностей при ED заключается в том, что на практике весь рабочий диапазон генерирующих источников не всегда

доступен для распределения нагрузки в связи с физическими ограничениями.

За прошедшее время для решения задач ED использовались различные методы:

- метод релаксации Лагранжа,
- линейное программирование,
- алгоритмы динамического программирования,
- квадратичное программирование,
- метод Ньютона-Рафсона,
- генетические алгоритмы и ИНС.

Методы Лагранжа, которые наиболее часто используются при решении ED-проблем, уже не дают желаемого результата при прямом использовании.

Методы динамического программирования также являются широко распространенными и изученными, но при их использовании на ЭЭС реальных размеров с большим количеством генерирующих источников приводит к так называемому «проклятию размерности», экспоненциальному увеличению объемов данных.

Главными недостатками генетических алгоритмов в решении задач ED являются сложность определения функции приспособленности, а также нахождение субоптимальных решений без гарантии того, что эти решения не являются локальными, и долгое время поиска.

Искусственная нейронная сеть, а в особенности, нейронная сеть Хопфилда [4, 5] продемонстрировали прекрасную способность решения комбинационных задач оптимизации. Нейронная сеть Хопфилда применяется для энергоблоков с непрерывной или кусочно-квадратичной функцией стоимости топлива. Повышенный интерес к этой нейронной сети обусловлен ее возможностью учета всех вынужденных ограничений, например, потерь при передаче энергии, контроля уровней загрязнения энергоблока и т. д.

Также для решения задач ED используются многослойный персептрон.

Принципиальной задачей любой ЭЭС является доставка в необходимых объемах конечному пользователю электроэнергии без превышения допустимых пределов по напряжению и частоте.

Эта задача должна решаться в режиме реального времени самым безопасным, надежным и при этом экономически эффективным методом.

Уровень безопасности системы определяется на основе моделирования потенциального сбоя задействованного в ЭЭС оборудования.

В случае реальных ЭЭС возникает проблема экспоненциального роста данных, получившая название «проклятия размерности». Данную проблему возможно решить, используя ИНС.

Из всех типов ИНС для задач оценки безопасности системы наиболее подходит многослойный персептрон, обучаемый по методу обратного распространения ошибки.

Основным преимуществом этой ИНС является ее способность к обучению в онлайн-режиме. Главные же проблемы этой ИНС заключаются в выборе входных данных и перетренировке. Для ускорения систем на основе многослойного персептрона используют ИНС Хопфилда.

В статье предлагается алгоритм построения оптимального плана распределения мощности в сети с помощью линейного программирования [6], который можно для получения исходных данных для обучения нейронной сети.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка алгоритмов построения оптимального плана поставок ресурса (электроэнергии) от поставщиков к потребителям при наличии у потребителей возможности перераспределения этого ресурса между собой в условиях недетерминированного поведения участников поставок и наличии потерь передачи энергии.

Для достижения поставленной цели в случае потерь необходимо разработать методику применения моделей и методов линейного программирования для решения оптимизационной задачи распределения мощности в сетях электроснабжения.

Алгоритм построения распределения мощности в сетях электроснабжения с потерями

Поскольку транспортная задача является частным случаем задачи линейного программирования, то, не изменяя идеи предложенного в работе [7] алгоритма распределения мощности без потерь, для распределения мощности с учет потерь необходимо ввести соответствующие коэффициенты, отражающие потери мощности и перейти к более общей постановке задачи линейного программирования.

Для случая перераспределения энергии между потребителями потребитель одновременно является поставщиком, однако поставляемый им ресурс заимствован, т.е. энергетиче-

ский узел становится вторичным поставщиком. План является оптимальным, если целевая функция F, определяющая суммарную стоимость (затраты) передачи электроэнергии в сети, будет минимальна. Следовательно, перераспределение электроэнергии между узлами целесообразно тогда, когда стоимость поставок между узлами ниже затрат на передачу от источника энергии (АЭС, ТЭЦ, ГЭС и т.д). Кроме того, максимальная мощность ИЭ и максимальная пропускная способность ЭУ не являются фиксированными. Предполагаем, что информация об их значении поступает в момент построения плана поставок одновременно с текущими потребностями (нагрузками) в узлах.

Предлагаемый алгоритм предполагает несколько итераций в определении плана поставок, его входных параметров и выходных параметров. Прежде, чем рассматривать алгоритм построения плана поставок, введем следующие обозначения в терминах постановки транспортной задачи:

$M_s^{(p)}$ $(s=\overline{1,n})$ – мощность s-го ИЭ (поставщика) при p-ой итерации;

K_l $(l=\overline{1,m})$ – собственные потребности (нагрузка) l-го ЭУ (потребителя) в ресурсе;

$M_{\max s}$ и $K_{\max l}$ – максимальная мощность s-го ИЭ и максимальная пропускная способность (возможность принятия ресурса) l-го ЭУ соответственно на начало построения плана;

$\Delta K_l^{(p)}$ $(l=\overline{1,m})$ – мощность, отдаваемая в сеть l-ым ЭУ при p-ой итерации;

$x_{ij}^{(p)}$ $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n})$ – мощность, поставляемая i-му ЭУ от j-го ИЭ при p-ой итерации;

$y_{ij}^{(p)}$ $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,m})$ – перетоки мощности, т.е. мощность, поставляемая i-му ЭУ (потребитель) от j-го ЭУ (вторичный поставщик) при p-ой итерации;

c_{ij} $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n})$ – стоимость поставки единицы ресурса i-му ЭУ от j-го ИЭ без потерь;

z_{ij} $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,m})$ – стоимость поставки единицы ресурса i-му ЭУ от j-го ЭУ без потерь;

$F^{(p)}$ – целевая функция при p-ой итерации.

a_{ij} $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n})$ – коэффициент потерь мощности при передаче ресурса i-у ЭУ от j-го ИЭ;

b_{ij} $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,m})$ – коэффициент потерь мощности при передаче ресурса i-у ЭУ от j-го ЭУ.

В случае отсутствия связей между элементами сети, стоимость поставки единицы ресурса равна ∞ (в расчетах принимает очень большую величину).

Для работы алгоритма необходимо соблюдения следующего ограничения

$$\sum_{l=1}^{m} K_{\max l} \le \sum_{s=1}^{n} M_s .$$

Этапы алгоритма.

Этап I. Строим математическую модель задачи линейного программирования для поставщиков с $M_s^{(0)} = M_{\max s}$ $(s=\overline{1,n})$ и потребителей K_l $(l=\overline{1,m})$, $\Delta K_l^{(1)} = K_{\max l} - K_l$ $(l=\overline{1,m})$.

Необходимо найти план поставок, т.е. $x_{ij}^{(1)}$ $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n})$ и $y_{ij}^{(1)}$ $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n})$, удовлетворяющий следующим ограничениям

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{lj}^{(1)} = K_l,\ l=\overline{1,m} \\ \sum_{j=1}^{n} y_{lj}^{(1)} = \Delta K_l^{(1)},\ l=\overline{1,m} \\ \sum_{i=1}^{m} a_{is} x_{is}^{(1)} + \sum_{i=1}^{m} a_{is} y_{is}^{(1)} \le M_s^0,\ s=\overline{1,n} \\ x_{lj}^{(1)} \ge 0,\ \ y_{lj}^{(1)} \ge 0 \end{cases}$$

и оптимизирующий целевую функцию

$$F^{(1)} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{lj} x_{lj}^{(1)} c_{ij} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{lj} y_{lj}^{(1)} c_{ij} \to \min .$$

Решение задачи выполняется симплекс-методом. В результате приходим к новым значениям мощностей ИЭ

$$M_s^{(1)} = M_s^0 - \sum_{i=1}^{m} a_{is} y_{is}^{(1)} \ \ (s=\overline{1,n}).$$

Этап II. Строим математическую модель задачи линейного программирования для поставщиков с $M_s^{(1)}$ $(s=\overline{1,n})$ и $\Delta K_l^{(1)}$ $(l=\overline{1,m})$ и потребителей K_l $(l=\overline{1,m})$.

Необходимо найти план поставок, т.е. $x_{ij}^{(2)}$ $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n})$ и $y_{ij}^{(2)}$ $(i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,m})$,

удовлетворяющий следующим ограничениям

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{lj}^{(2)} + \sum_{j=1}^{m} y_{lj}^{(2)} = K_l, \; l = \overline{1,m} \\ \sum_{i=1}^{m} a_{is} x_{is}^{(2)} \le M_s^{(1)}, \; s = \overline{1,n} \\ \sum_{i=1}^{m} b_{il} y_{il}^{(2)} \le \Delta K_l^{(1)}, \; l = \overline{1,m} \\ x_{lj}^{(2)} \ge 0, \; y_{lj}^{(2)} \ge 0 \end{cases}$$

и оптимизирующий целевую функцию

$$F^{(2)} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_{lj}^{(2)} c_{ij} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} b_{ij} y_{ij}^{(2)} z_{ij} \to \min$$

Решение задачи выполняется симплекс-методом. В результате приходим к новым значениям мощностей ИЭ $M_s^{(2)}$ и перетоков мощностей ЭУ $\Delta K_l^{(2)}$.

Определяем для всех ИЭ мощности ΔM_s ($s = \overline{1,n}$), которые используется вторичными поставщиками и являются перетоками мощности. Для этого сформируем две матрицы, а именно **W** размерностью m×m и **Y** размерностью m×n в следующем виде

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, \text{если } y_{ij}^{(2)} \ne 0 \\ 0, \text{если } y_{ij}^{(2)} = 0 \end{cases},$$

$$y_{ij} = a_{ij} y_{ij}^{(1)}.$$

Выполнив матричное умножение **W** и **Y**, получим матрицу размерностью m×n

W Y=D.

Определение ΔM_s осуществляется через элементы **D** по следующей формуле

$$\Delta M_s = \sum_{i=1}^{m} d_{is} \; (s = \overline{1,n}).$$

Этап III. Строим математическую модель задачи линейного программирования для поставщиков с ΔM_s ($s = \overline{1,n}$) и потребителей $\Delta K_l^{(2)}$ ($l = \overline{1,m}$).

Необходимо найти план поставок, т.е. и $y_{ij}^{(3)}$ ($i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$), удовлетворяющий следующим ограничениям

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m} a_{is} y_{is}^{(3)} = \Delta M_s, \; s = \overline{1,n} \\ \sum_{i=1}^{n} y_{il}^{(3)} = \Delta K_l^{(2)}, \; l = \overline{1,m} \\ y_{lj}^{(3)} \ge 0 \end{cases}$$

и оптимизирующий целевую функцию

$$F^{(3)} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij} y_{ij}^{(3)} c_{ij} \to \min.$$

Решение задачи выполняется симплекс-методом. В результате приходим к новым значениям мощностей ИЭ $M_s^{(3)}$

$$M_s^{(3)} = M^{(2)}{}_s + \Delta M_s \; (s = \overline{1,n}).$$

Результат работы алгоритма – план сетевого распределения мощности с учетом потерь, который можно представить в форме таблице.

Таблица. *Результирующий план сетевого распределения мощности при наличии потерь*

	$M_1^{(1)}$	…	$M_n^{(1)}$	$\Delta K_1^{(1)}$	..	$\Delta K_m^{(1)}$
K_1	$a_{11}x_{11}^{(2)}$		$a_{1n}x_{1n}^{(2)}$	$b_{11}y_{11}^{(2}$		$b_{1m}y_{1m}^{(2)}$
⋮	⋮	⋮	⋮			
K_m	$a_{m1}x_{m1}^{(2)}$		$a_{mn}x_{mn}^{(2)}$	$b_{m1}y_{n}^{(}$		$b_{mm}y_{mn}^{(2}$
$\Delta K_1^{(2)}$	$a_{11}y_{11}^{(3)}$		$a_{1n}y_{1n}^{(3)}$			
⋮	⋮	⋮				
$\Delta K_m^{(2)}$	$a_{m1}y_{m1}^{(3)}$		$a_{mn}y_{mn}^{(3)}$			

Результирующие значение целевой функции определяется формулой

$$F = F^{(2)} + F^{(3)}$$

Заключение

Выполнено дальнейшее развитие полученной ранее модифицированной модели транспортной задачи для случая использования потребителей в качестве вторичных поставщиков без потерь мощности. Данная модель использо-

вана как основа для решения аналогичной задачи распределения мощности, но при наличии потерь мощности в сети. Предложен алгоритм построения и одновременно решения задачи планирования поставок на основе созданных моделей и классических методов линейного программирования.

Предполагается, что результаты работы созданного алгоритма будут использованы для обучения нейронных сетей, обеспечивающих более высокое быстродействие с заданной точностью в режиме опроса, чем функционирование программного блока на основе предложенного алгоритма.

Список литературы

1. Каменев А.С., Королев С.Ю., Сокотущенко В.Н. Нейромоделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных сетей / Под ред. В.В. Бушуева – М.: ИЦ «Энергия», 2012. – 124 с.
2. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. – Сыктывкар: К УрО РАН, 2008. – 77с.
3. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. – М.: Мир, 1992. – 237с.
4. Змитрович А И. Интеллектуальные информационные системы. – Минск: НТООО «ТетраСистемс», 1997. – 368 с.
5. Гужов С.В. Интеллектуальные электросети и энергоменеджмент в развитии регионов России// Энергосбережение, 2015. – №7 – С. 46-49
6. Вентцель Е.С. Исследование операций – М.: Сов. радио, 1972. – 324с.
7. Качур С.А. Модификация транспортной задачи при наличии перераспределения ресурсов между потребителями //Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2017. – Т.3. – №3. – С. 39-44.

References

1. Kamenev A.C., Korolev C.Yu.. *Sokuschenko V.N. Nejromodelirovanie kak instrument intellektualizacii energoinformacionnuh setej* [Neuronsimulation as instrument of intellectualization of energeinformational nets]. Moscow, IC «Energiya», 2012, 124 p.
2. Shumilova G.P., Gotman N.E., Starceva T.B. *Prognozirovanie elektricheskih nagruzok pri operativnom upravlenii elektroenergeticheskimi sistemami na osnove nejrosetevyh struktur* [Prognostication of the electric loadings at the active control by the electroenergy systems on the basis of neuronets structures]. Suvtuvkar, K UrO RAN, 2008, 77p.
3. Uosserman F. *Nejrokomp'yuternaya tecnika: Teoriya i praktika* [Neurocomputer technique: Theory and practice]. Moscow, Mir, 1992, 237 p.
4. Zmitrovich A.I. *Intellektual'nay informacionnye sistemy* [Intellectual informative systems]. Misk, NTOOO «TeraSistems», 1997, 368 p.
5. Guzhov C.V. Intellectual electric systems and энергоменеджмент in development of regions of Russia. Energosberezhenie, 2015, №7, pp.46-49
6. Ventcel' E.S. *Issledovanie operacij* [Operations analysis] Moscow, Sov. radio, 1972, pp. 324.
7. Kachur S.A. Modification of Traffic Problem at Presence of Redistribution of Resources between Users. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2017, Vol. 3, No 3, pp. 39-44.

УДК.621.039.586

Анализ использования компенсирующего устройства типа CHDB 202 в новых конфигурациях сети

В.В. Смирнов[1], А.И. Кавун[2], Т.С. Максименко[3], М.А. Старченко[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]a1a67@yandex.ru, svadick@mail.ru,[1] avraam.kavun@mail.ru,[2] tausik.maxy@yandex.ru,[3] warrior2me@gmail.com [4]

Статья поступила 16.11.2018 г.; после доработки 19.11.2018 г.

Аннотация

Рассматривается актуальная проблема компенсации и увеличения пропускной способности. Предложено использование УПК типа CHDB 202 в существующей энергосистеме Крыма при изменении перетоков мощности.

Ключевые слова: компенсирующее устройство, пропускная способность, реактивная мощность, потери, батареи, перспективы.

Analysis of the use of compensating device type CHDB 202 in new network configurations

V.V. Smirnov[1], A.I. Kavun[2], T.S. Maximenko[3], M.A. Starchenko[4]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.[1]a1a67@yandex.ru, svadick@mail.ru,[1] avraam.kavun@mail.ru,[2] tausik.maxy@yandex.ru,[3] warrior2me@gmail.com [4]

Received 16.11.2018 y.; received in final form 19.11.2018 y.

Abstract

The actual problem of compensation and capacity increase is considered. It is proposed to use the CPC type CHDB 202 in the existing power system of the Crimea when changing power flows.

Keywords: compensating device, throughput, reactive power, losses, batteries, prospects.

Введение

Основной нагрузкой в электросетях являются асинхронные электродвигатели и распределительные трансформаторы.

Потребляемая ими реактивная энергия совершает колебательные движения между нагрузкой и источником (генератором), она не связана с выполнением полезной работы, а расходуется на создание электромагнитных полей и создает дополнительную нагрузку на силовые линии питания.

Наличие реактивной мощности является паразитным фактором, неблагоприятным для сети в целом [1].

В результате этого:

- возникают дополнительные потери в проводниках вследствие увеличения тока;
- снижается пропускная способность распределительной сети;
- отклоняется напряжение сети от номинала (падение напряжения из-за увеличения реактивной составляющей тока питающей сети).

Все сказанное выше является основной причиной того, что предприятия электроснабжения требуют от потребителей снижения доли реактивной мощности в сети.

Решением данной проблемы является использование компенсирующих устройств.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью статьи является анализ опыта использования компенсирующих устройств на севере Крыма и возможности применения их как в нынешней конфигурации электрических сетей, таки при будущих модернизациях.

Устройства продольной компенсации (УПК) типа CHDB 202

Данные устройства применяются для увеличения пропускной способности воздушных линий и представляют собой батареи конденсаторов. УПК включается последовательно в линии электропередачи для компенсации части продольного индуктивного сопротивления. Устройство этого типа входит в группу устройств и аппаратов, которую чаще всего называют гибкими системами передачи переменного тока (FACTS).

Принцип действия FACTS основывается на параллельной и продольной компенсации. При параллельном включении системы реактивный ток передается в линию для поддержания значения напряжения. Передаваемая активная мощность возрастает за счет уменьшения реактивной мощности (рис. 1).

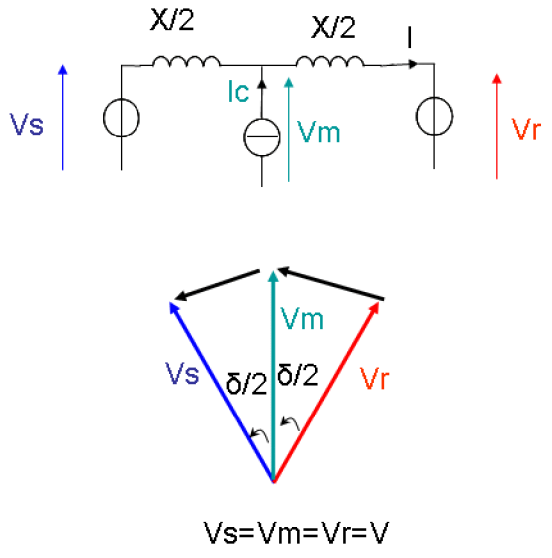

Рис. 1. Параллельная компенсация.

А при последовательном включении системы изменяет сопротивлении линии.

При этом возрастает передаваемая активная мощность. FACTS применяются в системах передачи, распределения, а также для промышленности (рис. 2)

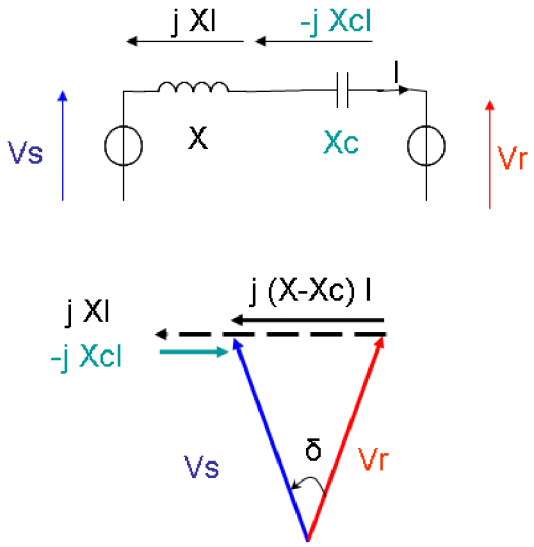

Рис. 2. Последовательная компенсация.

Особенности управляемых устройств продольной компенсации

Используемая в управляемых УПК (УУПК) часть конденсаторной батареи шунтируется тиристорным регулятором, что позволяет плавно изменять ее эквивалентную емкость в зависимости от режима работы линии (рис. 3).

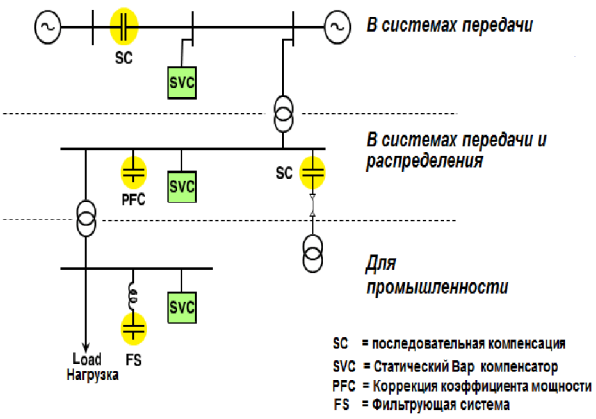

Рис. 3. Схемы включения батарей конденсаторов.

При этом появляется возможность не только гибкого изменения сопротивления линии, но и демпфирования переходных процессов в энергосистемах, в том числе подавление субсинхронного резонанса, возникающего при взаимодействии электрических колебаний в сети с

механическими колебаниями вращающихся частей турбогенераторов электрических станций [2].

Схема с реактором, регулируемая с помощью тиристоров применяется почти во всех сетях 35 кВ и выше.

Увеличивая угол регулирования тиристоров от 0 до $\pi/2$, изменяют величину тока, протекающего через реактор, от номинального значения до нуля. Достоинством является высокая надежность тиристорного управления. Недостатком наличие высших гармоник в токе, который потребляется реактором из сети. Поэтому в этой схеме обязательно должны быть фильтры, настроенные на нечётные гармоники (фильтры CF).

Вместо реактора может быть применён реактор-трансформатор для снижения напряжения на коммутируемых тиристорах. Также существует схема с включением конденсаторной батареи и СТК через понижающий трансформатор (автотрансформатор), позволяя работать тиристорам на пониженном напряжении.

В установках продольной компенсации возможны перенапряжения, которым подвергается конденсатор при протекании через установку чрезмерного тока нагрузки или короткого замыкания, и разряд конденсаторов при шунтировании установки разрядником.

Конденсаторы для продольной компенсации в исполнении для наружных установок обладают большой перегрузочной способностью и допускают кратковременные перенапряжения до 4-кратного номинального.

Обычно, не шунтируют последовательный конденсатор при внешних отказах, даже если это приводит к увеличению нагрузок на элементы системы под воздействием восстанавливающихся напряжений переходных режимов и дополнительным затратам на варисторы.

Использование новой системы защиты позволяет в обычном режиме шунтировать внешние отказы, предоставляя ряд преимуществ [3].

В условиях промышленных предприятий продольная компенсация находит применение при резкой переменной нагрузке на линиях, питающих мощные сварочные установки, для питания дуговых печей, в целях регулирования напряжения и устранения колебаний его, а также для улучшения потока распределения в параллельных линиях электропередачи с различными соотношениями индуктивных и активных сопротивлений.

В РФ УПК на тяговых подстанциях устанавливается в потребляющую линию.

В потребляющей линии УПК участвует в повышении напряжения, устраняет эффект опережающей и отстающей фаз, достигается симметрия напряжения при равных токах в плечах питания, снижает класс напряжения применяемого оборудования и упрощает конструктивное выполнение установки.

Технические характеристики УПК типа CHDB 202:

- Номинальная мощность – 189 МВА;
- Номинальное напряжение – 330 кВ;
- Номинальный ток – 1450 А;
- Емкостное сопротивление – 30 Ом;
- Увеличение пропускной способности – 50 МВт.

Перспективы использования компенсирующих устройств

Рассмотрим УПК типа CHDB 202, установленное на подстанции «Джанкой», в частности на линии «Мелитополь – Джанкой».

Эта установка была собрана и поставлена шведско-швейцарской компанией ABB.

Присутствует в единственном экземпляре в Крыму.

После прекращения поставки электроэнергии со стороны Украины – работает ограниченно.

Так как проблема компенсации и увеличения пропускной способности линий всегда актуальна, то в процессе модернизации энергетической системы возможно ее подключение на питающей линии со стороны: Краснодарский край – Керчь - Джанкой.

Одной из особенностей данной установки является наличие волоконно-оптического преобразователя тока (ВОПТ) или оптического трансформатора тока.

На данный момент электроэнергия поступает с Единой энергосистемы России по линии 220 кВ «Тамань – Кафа» и «Тамань – Камыш-Бурунская» в транзитную ПС 220 кВ «Кафа». Включение установки CHDB 202 может увеличить пропускную способность линий 220 кВ «Кафа – Симферопольская I цепь» и «Кафа – Симферопольская II цепь», которые являются основой электроэнергетики Крыма (рис. 4).

Рис. 4. Электроэнергетика Крыма.

Заключение

В статье рассмотрено устройство продольной компенсации типа CHDB 202, особенности его работы и включения. Также был проведен краткий анализ гибкой системы передачи переменного тока (FACTS).

При проведении модернизации энергосистемы Крыма целесообразно рассмотреть возможность включения в работу УПК типа CHDB 202 подстанции «Джанкой», ранее подключенной на ЛЭП со стороны Украины.

Список литературы

1. Б.И. Кудрин - Электроснабжение потребителей и режимы: учебное пособие / Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, Ю.В. Матюнина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 412 с.: ил.
2. Ю.Н. Балаков – Безопасность электрических сетей в вопросах и ответах, часть 2. Техническое обслуживание электрических сетей. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 564 с.: ил.
3. В.Г. Бирюлёв – Типовая инструкция по эксплуатации бесщеточных систем возбуждения синхронных компенсаторов КСВ-50000-11 / В.Г. Бирюлёв, Ю.А. Шмайн. – Москва, лабораторией электрических машин ВНИИЭ, 2009.

Refernces

1. B. I. Kudrin - power supply to consumers and modes: training manual / B. I. Kudrin, B. V. Zhilin, Yu. – M.: Publishing house MEI, 2013. - 412 p.: Il.
2. U. N. Balakov - Safety of electric networks in questions and answers, part 2. Maintenance of electrical networks. – M.: Publishing house MEI, 2013. - 564 p.: Il.
3. V. G. Birulev – Standard instruction manual for brushless excitation systems for synchronous compensators the CWS-50000-11 / V. G. Birulev, J. A. Smine. - Moscow, laboratory of electric machines VNIIE, 2009.

УДК.621.039.586

Сравнительный анализ волоконно-оптических преобразователей тока и напряжения и электромагнитных измерительных трансформаторов

В.В Смирнов[1]., А.И. Кавун[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]a1a67@yandex.ru, Svadick@mail.ru,[1] avraam.kavun@mail.ru,[2]

Статья поступила 16.11.2018 г.; после доработки 21.11.2018 г.

Аннотация

Оптические трансформаторы тока и напряжения свободны от многих недостатков, свойственных традиционным электромагнитным трансформаторам. ВОП позволяет измерять параметры электрического тока без дополнительного потребления энергии из линии, в то время как измерение тока с помощью традиционных трансформаторов приводит к потерям электрической энергии. Ключевой особенностью ВОП является представление исходной информации об измеренном токе в цифровом виде. Этот факт позволяет без дополнительных преобразований собирать, обрабатывать, хранить и передавать информацию на любые расстояния в реальном времени.

Ключевые слова: волоконно-оптический, трансформатор, эффект Фарадея, класс точности, ток, напряжение, измерение, электрогирация.

Comparative analysis of fiber-optic current and voltage converters with electromagnetic measuring transformers

V.V. Smirnov[1], A.I. Kavun[2]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.[1]a1a67@yandex.ru, Svadick@mail.ru,[1] avraam.kavun@mail.ru,[2]

Received 16.11.2018 y.; received in final form 21.11.2018 y.

Abstract

Optical current and voltage transformers are free from many disadvantages inherent in traditional electromagnetic transformers. FOC allows to measure the parameters of the electric current without additional energy consumption from the line, while the measurement of the current with the help of traditional transformers leads to losses of electric energy. A key feature of the FOC is the representation of the initial information about the measured current in digital form. This fact allows to collect, process, store and transmit information at any distance in real time without additional transformations.

Keywords: fiber-optic, transformer, Faraday effect, accuracy class, current, voltage, measurement, electric gyration

Введение

Волоконно-оптические преобразователи тока и напряжения имеют ряд преимуществ перед традиционными измерительными трансформаторами.

Одними из основных являются принципы их действия. ВОПТ работает на основе эффекта Фарадея.

Он проявляется в повороте плоскости поляризации линейно поляризованного света. Принцип действия ВОПН основан на использовании электрооптического эффекта электрогирации, который проявляется в появлении оптической активности центрально симметричных

кристаллов под действием напряженности электрического поля измеряемого напряжения.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью работы является анализ целесообразности применения оптоволоконных измерительных трансформаторов в силовых электрических сетях.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать недостатки, свойственные традиционным электромагнитным трансформаторам;
- рассмотреть основные принципы функционирования оптических трансформаторов, определяющие их достоинства;
- провести сравнительный анализ характеристик ныне используемых измерительных трансформаторов и оптоволоконных трансформаторов.

Основные преимущества волоконно-оптических преобразователей

Измерительные волоконно-оптические трансформаторы тока и напряжения не требуют замены и контроля масла, регулярного ремонта или проверки, а лишь поверки прибора и его выходных характеристик раз в 6 лет (затраты не превышают 2% от стоимости прибора за все время эксплуатации) [1].

Традиционные трансформаторы имеют значительную неравномерность амплитудно-частотной характеристики, вызванную наличием компенсирующего реактора. Частотная характеристика электромагнитных трансформаторов имеет резонансные пики в области частот 1000-1600 Гц. В то время, как линейность амплитудно-частотной характеристики в диапазоне от 30 до 5000 Гц позволяет осуществить контроль качества электрической энергии с возможностью оценки до 100 гармонических составляющих напряжения и тока в высоковольтных цепях (рис. 1).

Также, преимуществом волоконно-оптических трансформаторов является значительно меньшие погрешности в измерениях. Оптические трансформаторы тока и напряжения свободны от многих недостатков, свойственных традиционным электромагнитным трансформаторам. ВОП позволяет измерять параметры электрического тока без дополнительного потребления энергии из линии, в то время как измерение тока с помощью традиционных трансформаторов приводит к потерям электрической энергии.

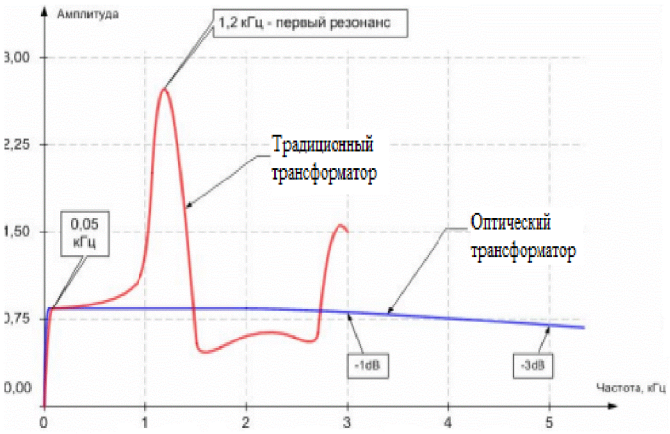

Рис. 1. Сравнительные частотные характеристики.

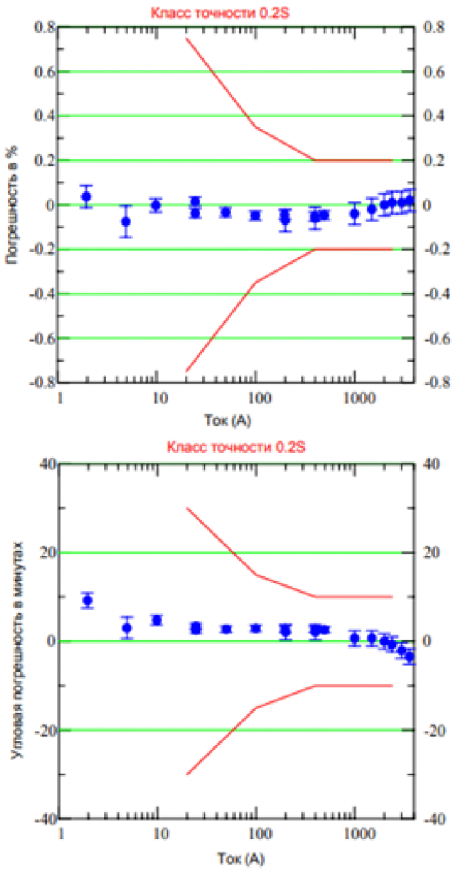

Рис. 2. Погрешность измерений ВОПТ.

В традиционных трансформаторах, в области малых токов ($I_{раб} < 20\%I_{ном}$) статические погрешности в зависимости от условий эксплуатации, могут достигать от десятых долей про-

цента до единиц процентов.

А в ВОП амплитудная характеристика линейна в диапазоне токов (0,2% - 200%) $I_{ном}$ (рис.2) [2].

Также, погрешности вторичных цепей электромагнитных трансформаторов нормируются величиной 0,25%.

Погрешности, обусловленные несбалансированностью нагрузки, могут достигать значения 0,2%.

В то время, как для оптических трансформаторов длина вторичных цепей ограничена расстоянием от комплекта электроники до панели учета.

Наличие цифрового интерфейса в этих трансформаторах устраняет потери, связанные с дополнительными погрешностями вторичных цепей и влияния вторичных нагрузок на точностные характеристики трансформаторов (рис. 3).

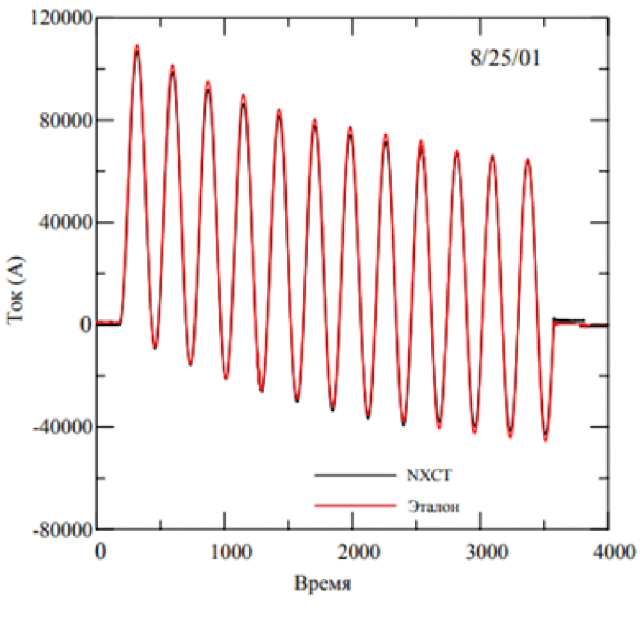

Рис. 3. Переходные характеристики ВОПТиН.

Безопасность и эксплуатация

В отличие от традиционных трансформаторов, в которых при размыкании вторичной цепи на выводах могут генерироваться напряжения, значительно превышающие номинальные значения, в ВОП изоляционная колонна заполнена азотом и безопасна для персонала и размещенного рядом оборудования [3].

Маслонаполненные трансформаторы относят к категории наиболее опасного оборудования из-за большого количества масла, находящегося в контакте с высоковольтными элементами.

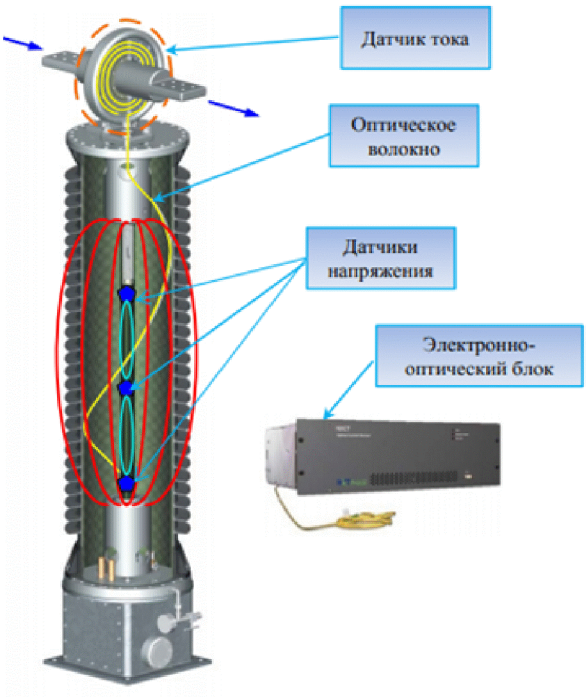

Рис. 4. Конструкция изоляционной колонны комбинированного трансформатора.

А конструкция оптического комбинированного трансформатора имеет тип изолятора не содержащего масла и газа (рис.4) [4].

Базовым обслуживанием для электромагнитных трансформаторов является:

- периодический контроль уровня и температуры масла, газосодержания и влагосодержания, проверка отсутствия течей. Контроль состояния системы охлаждения;
- проверка диэлектрических потерь (tg δ) и исследование проб масла, измерение сопротивления изоляции вторичных обмоток;
- взятие проб масла для проведения газохроматографического анализа и оценки его состояния.

Для ВОП данные процедуры не актуальны, так как:

- отсутствие масла позволяет избежать сложных процедур обслуживания;
- полимерный изолятор не требует очистки в течение всего срока службы;
- встроенная самодиагностика позволяет локально или удаленно следить за состоянием и режимами работы трансформаторов. Превентивная диагностика, основанная на построении трендов состояния наиболее важных компонентов трансформатора, поз-

воляет оценить фактическое состояние оборудования и спрогнозировать время возможного отказа;

- трансформаторы допускают полную аппаратную резервируемость электронных блоков в условиях эксплуатации без проведения процедуры калибровки.

Таблица 1. *Технические характеристики оптического преобразователя типа NXCT-245 и электромагнитного трансформатор ТГФ-220*

	NXCT-245	**ТГФ-220**
Номинальное напряжение, кВ	220-245	220
Номинальная частота, Гц	50	50
Номинальный первичный ток, А	400-4000	400-800
Номинальный вторичный ток, А	1, 5	1, 5
Ток электродинамической стойкости, кА	170	50-150
Ток термической стойкости, кА	63	20-60
Масса, кг	65	850

Заключение

В статье был проведен сравнительный анализ волоконно-оптических преобразователей и традиционных измерительных трансформаторов. В ходе сравнительного анализа были подробно рассмотрены технические характеристики волоконно-оптических трансформаторов тока и напряжения. Анализ показал, что ВОПТиН имеют следующие преимущества:

- не требуют контроля и замены масла;
- не требуют регулярного ремонта и проверок;
- большой частотный диапазон измерений;
- значительно меньшие погрешности измерений;
- изоляционная колонна заполнена азотом и безопасна для персонала и размещенного рядом оборудования;
- встроенная самодиагностика позволяет удаленно следить за состоянием трансформаторов;
- имеют значительно меньшие массогабаритные характеристики (рис. 5);

Также, в следствие уменьшения потерь и фактической стоимости рассмотренных оптических трансформаторов, значительно увеличена

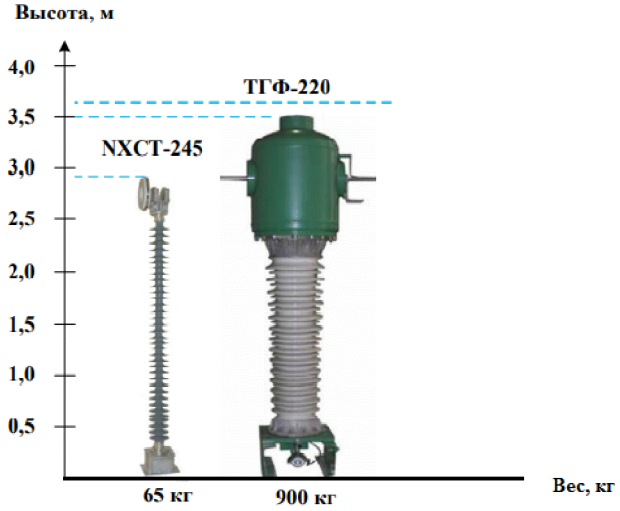

Рис. 5. Массогабаритные характеристики.

экономическая целесообразность установки волоконно-оптических преобразователей тока и напряжения.

Список литературы

1. Б.И. Кудрин. Электроснабжение потребителей и режимы: учебное пособие /Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, Ю.В. Матюнина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 412 с.:ил.
2. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Л.В. Жалалис. Трансформаторы тока; - Л.: Энергия, 1980 г.
3. Красюк Б.А., Корнеев Г.И. Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии. - М.: Радио и связь, 1985, 192 с.

References

1. B. I. Kudrin. Electricity supply and modes: a training manual /B. I. Kudrin, B. V. Zhilin, V. Matyunina. – M.: Publishing house MEI, 2013. - 412 p.: Il.
2. Afanasiev V. V., Adoni N. M. L. V. MS-lalis. Current transformers; - L.: Energy, 1980
3. Krasyuk, B. A., Korneev G. I. Optical communication systems and fiber sensors. Technology issues. - Moscow: Radio and communication, 1985, 192 p.

УДК.621.315.1

Сравнительный анализ целесообразности применения проводов с композитным сердечником и проводов традиционной конструкции

В.В. Смирнов[1], А.А. Лавренчук[2], Т.С. Максименко[3], М.А. Старченко[4], Е.Ю. Чернова[5]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]svadick@mail.ru, [2]AALavrenchuk@sevsu.ru, [3]tausik.maxy@yandex.ru, [4]warrior2me@gmail.com , [5]nikekaterina6@gmail.com

Статья поступила 13.11.2018 г.; после доработки 26.11.2018 г.

Аннотация

Одной из важнейших характеристик воздушной линии является ее механическая прочность. В статье проведен сравнительный анализ проводов с композитным сердечником и традиционного сталеалюминевого провода на основании расчетов механических характеристик. Из полученных результатов сделан вывод о целесообразности применения проводов с композитным сердечником.

Ключевые слова: композитный сердечник, надежность энергосистемы, механическая прочность воздушных линий.

Comparative analysis of the use of composite core wires with wires of traditional construction

V.V. Smirnov[1], A.A. Laurenchuk[2], T.S. Maximenko [3], M.A. Starchenko [4], E.Yu. Chernova [5]

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. [1]svadick@mail.ru, ,[3]tausik.maxy@yandex.ru, [4]warrior2me@gmail.com , [5]nikekaterina6@gmail.com

Received 13.11.2018 y.; received in final form 26.11.2018 y.

Abstract

One of the most important characteristics of an overhead line is its mechanical strength. The article presents a comparative analysis of composite core wires with a traditional steel-aluminum wire based on calculations of mechanical characteristics. From the obtained results it was concluded that the use of composite core wire is advisable.

Keywords: composite core, power system reliability, mechanical strength, mechanical loads

Введение

При проектировании воздушных линий (ВЛ) учитываются различные факторы, влияющие на надежность работы электрической сети. Так, учитывается нормативная толщина стенки гололеда, максимальный нормативный скоростной напор ветра в зависимости от климатической зоны, вес провода и его физико-механические характеристики.

На основании этих данных определяются такие показатели как: механические нагрузки и силы, действующие на провода и тросы, их механические напряжения в различных точках и при различных условиях работы, наибольшие стрелы провеса.

Поскольку лучшие механические характеристики провода позволяют спроектировать линию большей надежности, следует произвести механический расчет проводов с композитным сердечником и путем сравнительного анализа определить эффективность применения таких проводов при проектировании ВЛ.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является определение целесообразности применения проводов с композитным сердечником при проектировании ВЛ путем определения ее механической прочности с последующим сравнительным анализом полученных результатов с техническими характеристиками линии традиционной конструкции. Для выполнения поставленной цели необходимо:

- Произвести расчет на удельные механические нагрузки проводов;
- произвести расчет напряжения в материале провода;
- произвести расчет напряжения провода при разных климатических условиях;
- произвести расчет критической длины и температуры провода;
- определить допустимые напряжения и произвести расчет по среднегодовым условиям;
- выполнить анализ полученных данных.

Конструкция проводов с композитными сердечниками марок ACCC и ACCR

Для проведения механических расчетов необходимо предварительно рассмотреть конструкцию рассчитываемых проводов. С целью проведения сравнения были выбраны два провода с композитным сердечником американского производства: ACCC и ACCR.

Рассмотрим провод марки ACCC (Aluminum Conductor Composite Core (ACCC) cable) от компании Composite Technology Corp.'s. Построен он вокруг углеволоконного и стекловолоконного эпоксидного ядра (рис. 1).

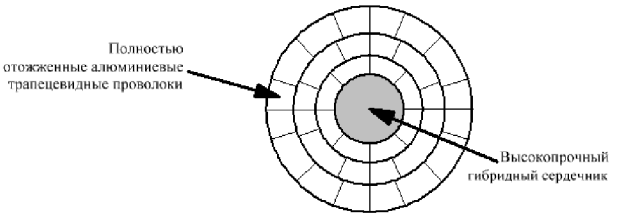

Рис. 1 - Алюминиевый провод с полимерным сердечником

Выполнен данный провод по технологии «полимерной матрицы». Суть технологии - использование свойств волокон разных типов, которые защищаются и формуются компаундами также разных типов. Волокна углерода, стекла и эпоксидного компаунда являются основой для производства сердечника проводов типа ACCC. Во время процесса пултрузии (процесс получения стеклопластиковых профилей путем вытягивания через нагретую до 130°C - 150°C формообразующую фильеру стекловолокнистых материалов, пропитанных полиэфирной смолой или другой термореактивной смолой) формируется цельный сердечник цилиндрической формы, в то время как слой волокон из Е-стекла укладывается вокруг наружной оболочки [1]. Связанные волокна пропитываются высокотемпературной связующей эпоксидной смолой.

Результатом является проволока (стержень) диаметром от 5 до 11 мм, которая и является готовым сердечником для проводов этого типа. Углеродное волокно само по себе устойчиво к температурам и не проводит электрический ток, стекловолокно служит искусственным барьером для предотвращения коррозии углерода и алюминия (наружного повива провода).

Эпоксидный компаунд образует матрицу, скрепляющую все слои.

Будучи полимером, эпоксид существенно хуже, чем алюминий, противостоит пластическим деформациям волокон при изгибах, стеклопластик же «уравновешивает» более хрупкое углеволокно и улучшает гибкость и прочность сердечника.

Система проводов ACCC может непрерывно работать при 180°C и может выдерживать кратковременные скачки до 200°C, с провисанием всего 10% от величины провисания провода традиционной конструкции [1]. В отличие от обычных проводников со стальным сердечником, которые имеют относительно высокий коэффициент термического расширения, сердечник проводника ACCC стабилен по размерам с коэффициентом термического расширения $1.6 \cdot 10^{-6}\ ^{o}C$ (у стали коэффициент термического расширения $11.5 \cdot 10^{-6}\ ^{o}C$).

Далее рассмотрим провод марки ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced).

Изготовлен он по технологии «металлической матрицы» (metal matrix composite). Сердечники, армированные несколькими тысячами волокон оксида алюминия (Al2O3), имеют диаметры от 1.9 мм до 2.9 мм. Оксид алюминия — это керамика, отличающаяся устойчивостью к высокой температуре и не проводящая электрический ток. Алюминий, как основа матрицы, практически не подвержен влиянию таких факторов окружающей среды, как влажность, уль-

трафиолет, озон и т.д. При этом, будучи мягким металлом, алюминий хорошо защищает волокна от пластических изгибов (смятий, смещений), что является основным механизмом повреждения продольно – ориентированных волокнистых структур. В проводе используется сердечник из металлокомпозита (в два раза легче стального сердечника), в обертке из высокотемпературных алюминий-цирконидных (Al-Zr) проводов (приблизительно в 9 раз прочнее и в 3 раза жестче алюминия в проводе АС) - конструкция, где и композитный сердечник, и наружные пучки AL-Zr дают вклад в прочность кабеля и повышение проводимости (рис. 2).

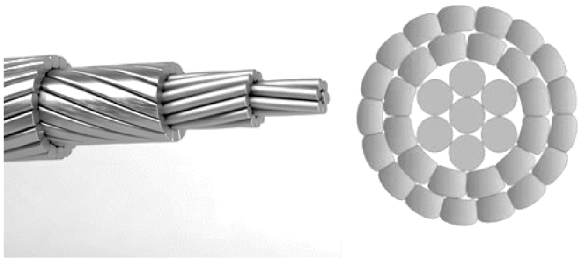

Рис.2 - Алюминиевый проводящий композитный усиленный провод

Наружные пряди Al-Zr являются температуростойким сплавом, который позволяет непрерывно работать при $210^{o}C$, с пиковыми нагрузками до $240^{o}C$ [1].

Расчет проводов АС, АССС, ACCR на механическую прочность

Для проведения расчетов выбираем провода близкие по значению номинального сечения АС-240/39, АССС 240/28, ACCR-TW 477-T16 (242/39).

Расчетные данные для соответствующих проводов выбираются из каталогов и справочной литературы [2,3,4].

При расчетах ВЛ на механическую прочность используются действительное сечение провода, несколько отличающееся от номинального сечения. Укажем действительные сечения рассматриваемых марок проводов:

$F_{ACCC} = 278.1 \ \ мм^2$

$F_{ACCR} = 276 \ \ мм^2$

$F_{AC} = 274.6 \ \ мм^2$

Осуществим расчет для семи режимов на удельные механические нагрузки проводов:

Удельная нагрузка от собственного веса проводов:

$\gamma_1 = 9.81\frac{G_0}{F}$, где G_0 - удельная масса провода, $кг/м$.

$$\gamma_{1.ACCC} = 9.81\frac{G_{0ACCC}}{F_{ACCC}} =$$

$$= 9.81 \cdot \frac{0.7}{278.1 \cdot 10^{-6}} = 24693 \ \ \frac{Н}{м^3};$$

$$\gamma_{1.ACCR} = 9.81\frac{G_{0ACCR}}{F_{ACCR}} =$$

$$= 9.81 \cdot \frac{0.801}{276 \cdot 10^{-6}} = 28470 \ \ \frac{Н}{м^3};$$

$$\gamma_{1.AC} = 9.81\frac{G_{0AC}}{F_{AC}} =$$

$$= 9.81 \cdot \frac{0.952}{274.6 \cdot 10^{-6}} = 34010 \ \ \frac{Н}{м^3};$$

1. Удельная нагрузка от веса гололеда (район по гололеду - III):

$$\gamma_2 = \frac{9.81 \cdot g_0 \cdot \pi \cdot b_г \cdot (d + b_г)}{F},$$

где $g_0 = 900 \ \ \frac{кг}{м^3}$ - плотность гололеда;

$b_г = 15 \ \ мм$ (1 раз в 10 лет) – толщина стенки гололеда для линии 110 кВ.

$$\gamma_{2.ACCC} = \frac{9.81 \cdot g_0 \cdot \pi \cdot b_г \cdot (d_{ACCC} + b_г)}{F_{ACCC}} =$$

$$= \frac{9.81 \cdot 900 \cdot 3.14 \cdot 0.015 \cdot (0.0235 + 0.015)}{278.1 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 57644 \ \ \frac{Н}{м^3};$$

$$\gamma_{2.ACCR} = \frac{9.81 \cdot g_0 \cdot \pi \cdot b_г \cdot (d_{ACCR} + b_г)}{F_{ACCR}} =$$

$$= \frac{9.81 \cdot 900 \cdot 3.14 \cdot 0.015 \cdot (0.02 + 0.015)}{276 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 52644 \ \ \frac{Н}{м^3};$$

$$\gamma_{2.AC} = \frac{9.81 \cdot g_0 \cdot \pi \cdot b_г \cdot (d_{AC} + b_г)}{F_{AC}} =$$

$$= \frac{9.81 \cdot 900 \cdot 3.14 \cdot 0.015 \cdot (0.0216 + 0.015)}{274.6 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 55426 \ \ \frac{Н}{м^3}.$$

Удельная нагрузка от веса гололеда и собственного веса:

$$\gamma_{3.ACCC} = \gamma_{1.ACCC} + \gamma_{2.ACCC} =$$

$$= 24693 + 57644 = 82337 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{3.ACCR} = \gamma_{1.ACCR} + \gamma_{2.ACCR} =$$

$$= 28470 + 52734 = 81204 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{3.AC} = \gamma_{1.AC} + \gamma_{2.AC} =$$

$$= 34010 + 52734 = 89436 \quad \frac{H}{м^3}.$$

2. Удельная нагрузка от давления ветра на провод с гололедом:

$$\gamma_5 = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot (d + 2 \cdot b_г)}{1.6 \cdot F},$$

где $\alpha = 0.75$ - коэффициент неравномерности скоростного напора;

$k_l = 1$ - коэффициент влияния длины пролета;

$c_x = 1.2$ - аэродинамический коэффициент лобового сопротивления провода; $v = 29 \quad \frac{м}{с}$ - скорость ветра для региона III.

$$\gamma_{5.ACCC} = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot (d_{ACCC} + 2 \cdot b_г)}{1.6 \cdot F_{ACCC}} =$$

$$= \frac{0.75 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 29^2 \cdot (0.0235 + 2 \cdot b_г)}{1.6 \cdot 278.1 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 91091 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{5.ACCC} = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot (d_{ACCC} + 2 \cdot b_г)}{1.6 \cdot F_{ACCC}} =$$

$$= \frac{0.75 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 29^2 \cdot (0.0235 + 2 \cdot 0.015)}{1.6 \cdot 278.1 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 91091 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{5.ACCR} = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot (d_{ACCR} + 2 \cdot b_г)}{1.6 \cdot F_{ACCR}} =$$

$$= \frac{0.75 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 29^2 \cdot (0.02 + 2 \cdot 0.015)}{1.6 \cdot 276 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 85699 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{5.AC} = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot (d_{AC} + 2 \cdot b_г)}{1.6 \cdot F_{AC}} =$$

$$= \frac{0.75 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 29^2 \cdot (0.0216 + 2 \cdot 0.015)}{1.6 \cdot 274.6 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 88892 \quad \frac{H}{м^3}.$$

3. Результирующая удельная нагрузка от веса провода:

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2}$$

$$\gamma_{7.ACCC} = \sqrt{\gamma_{3.ACCC}^2 + \gamma_{5.ACCC}^2} =$$

$$= \sqrt{82337^2 + 91091^2} = 122788 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{7.ACCR} = \sqrt{\gamma_{3.ACCR}^2 + \gamma_{5.ACCR}^2} =$$

$$= \sqrt{81204^2 + 85699^2} = 118061 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{7.AC} = \sqrt{\gamma_{3.AC}^2 + \gamma_{5.AC}^2} =$$

$$= \sqrt{89436^2 + 88892^2} = 126097 \quad \frac{H}{м^3}.$$

4. Удельная нагрузка от давления ветра на провод без гололеда:

$$\gamma_4 = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot d}{1.6 \cdot F}$$

$$\gamma_{4.ACCC} = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot d_{ACCC}}{1.6 \cdot F_{ACCC}} =$$

$$= \frac{0.75 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 29^2 \cdot 0.0235}{1.6 \cdot 278.1 \cdot 10^{-6}} == 40050 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{4.ACCR} = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot d_{ACCR}}{1.6 \cdot F_{ACCR}} =$$

$$= \frac{0.75 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 29^2 \cdot 0.02}{1.6 \cdot 276.1 \cdot 10^{-6}} == 34280 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{4.AC} = \frac{\alpha \cdot k_l \cdot c_x \cdot v^2 \cdot d_{AC}}{1.6 \cdot F_{AC}} =$$

$$= \frac{0.75 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 29^2 \cdot 0.0216}{1.6 \cdot 274.6 \cdot 10^{-6}} == 34455 \quad \frac{H}{м^3}.$$

Результирующая удельная нагрузка от веса провода и давления ветра на провод без гололеда:

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_4^2}$$

$$\gamma_{6.ACCC} = \sqrt{\gamma_{1.ACCC}{}^2 + \gamma_{4.ACCC}{}^2} =$$

$$= \sqrt{24693^2 + 40060^2} = 47058 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{6.ACCR} = \sqrt{\gamma_{1.ACCR}{}^2 + \gamma_{4.ACCR}{}^2} =$$

$$= \sqrt{28470^2 + 34280^2} = 44561 \quad \frac{H}{м^3};$$

$$\gamma_{6.AC} = \sqrt{\gamma_{1.AC}{}^2 + \gamma_{4.AC}{}^2} =$$

$$= \sqrt{34010^2 + 34355^2} = 48413 \quad \frac{H}{м^3}.$$

Для расчетов примем условную линия электропередач 110 кВ с длиной пролета 300 м.

Рассчитаем три критических длины пролеты для каждого провода:

$$l_{1кр} = \frac{2\sigma_э}{\gamma_1}\sqrt{\frac{6\ [(\sigma_э - \sigma_-)\frac{1}{E} + \alpha(t_э - t_-)]}{1 - \left(\frac{\sigma_э}{\sigma_-}\right)^2}};$$

$$l_{2кр} = \frac{2\sigma_г}{\gamma_1}\sqrt{\frac{6\ [(\sigma_г - \sigma_-)\frac{1}{E} + \alpha(t_г - t_-)]}{\left(\frac{\gamma_7}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_г}{\sigma_-}\right)^2}};$$

$$l_{3кр} = \frac{2\sigma_г}{\gamma_1}\sqrt{\frac{6\ [(\sigma_г - \sigma_э)\frac{1}{E} + \alpha(t_г - t_э)]}{\left(\frac{\gamma_7}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_г}{\sigma_э}\right)^2}}.$$

Для провода ACCC:

$$l_{1кр} = \frac{2\cdot 83.7}{2.47\cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{6\cdot\left[\frac{(83.7-111.6)}{6.4\cdot 10^4} + 12.9\cdot 10^{-6}(10+40))\right]}{1-\left(\frac{83.7}{111.6}\right)^2}} =$$

$= 363.2$ *м*;

$$l_{2кр} = \frac{2\cdot 111.6}{2.47\cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{6\cdot\left[\frac{0}{6.4\cdot 10^4} + 12.9\cdot 10^{-6}(-5+40))\right]}{\left(\frac{12.28}{2.47}\right)^2 - \left(\frac{111.6}{111.6}\right)^2}} =$$

$= 98.3$ *м*;

$$l_{3кр} = \frac{2\cdot 111.6}{2.47\cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{6\cdot\left[\frac{(111.6-83.7)}{6.4\cdot 10^4} + 12.9\cdot 10^{-6}(-5)\right]}{\left(\frac{12.28}{2.47}\right)^2 - \left(\frac{111.6}{83.7}\right)^2}} =$$

$= 89$ *м*.

Для провода ACCR:

$$l_{1кр} = \frac{2\cdot 90.9}{2.84\cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{6\cdot\left[\frac{(90.9-121.2)}{7.7\cdot 10^4} + 16.8\cdot 10^{-6}(10+40))\right]}{1-\left(\frac{90.9}{121.2}\right)^2}} =$$

$= 500.6$ *м*;

$$l_{2кр} = \frac{2\cdot 121.2}{2.84\cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{6\cdot\left[\frac{0}{7.7\cdot 10^4} + 16.8\cdot 10^{-6}(-5+40))\right]}{\left(\frac{11.81}{2.84}\right)^2 - \left(\frac{121.2}{121.2}\right)^2}} =$$

$= 125.6$ *м*;

$$l_{3кр} = \frac{2\cdot 121.2}{2.84\cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{6\cdot\left[\frac{(121.2-90.9)}{7.7\cdot 10^4} + 16.8\cdot 10^{-6}(-5)\right]}{\left(\frac{11.81}{2.84}\right)^2 - \left(\frac{121.2}{90.9}\right)^2}} =$$

$= 93.39$ *м*.

Для АС проведем аналогичный расчет:

$l_{1кр} = 458.4$ *м*;

$l_{2кр} = 113.6$ *м*;

$l_{3кр} = 76.8$ *м*.

Т.к. для каждого провода $l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}$, то уравнение состояния в пролете имеет вид:

$$\sigma - \frac{\gamma^2\cdot E\cdot l^2}{24\cdot\sigma^2} = \sigma_г - \frac{\gamma_7{}^2\cdot E\cdot l^2}{24\cdot\sigma_г{}^2} - \alpha\cdot E\cdot(t - t_г)$$

Рассчитаем стрелу провеса для каждого провода при трех режимах работы:

- Провода и тросы покрыты гололедом, $t = -5^oC$, ветровое давление $0.25W$;
- Провода и тросы покрыты гололедом, $t = -5^oC$, ветра нет;
- Ветровое давление W, $t = -5^oC$, гололеда нет.

Для АССС:

1. Для первого режима $\sigma = \sigma_г = 111.6 \quad МПа$

Стрела провеса для этого режима:

$$f = \frac{\gamma_7\cdot l^2}{8\cdot\sigma} = \frac{12.28\cdot 10^{-2}\cdot 300^2}{8\cdot 111.6} =$$

$= 12.38$ *м*

2. Второй режим

$$\sigma - \frac{\left(24.68\cdot 10^{-2}\right)^2\cdot 6.4\cdot 10^4\cdot 300^2}{24\sigma^2} =$$

$$= 111.6 - \frac{\left(12.28\cdot 10^{-2}\right)^2\cdot 6.4\cdot 10^4\cdot 300^2}{24\cdot 111.6^2} -$$

$$-16.8\cdot 10^{-6}\cdot 6.4\cdot 10^4[-5-(-5)]$$

$$\sigma - \frac{14618457}{\sigma^2} = -178.99$$

$$\sigma = 320.93$$

$$f = \frac{8.23 \cdot 10^{-2} \cdot 300^2}{8 \cdot 320.93} = 2.88 \quad м$$

3. Третий режим

$$\sigma - \frac{\left(57.64 \cdot 10^{-2}\right)^2 \cdot 6.4 \cdot 10^4 \cdot 300^2}{24 \cdot \sigma^2} =$$

$$= 111.6 - \frac{\left(12.28 \cdot 10^{-2}\right)^2 \cdot 6.4 \cdot 10^4 \cdot 300^2}{24 \cdot 111.6^2} -$$

$$-16.8 \cdot 10^{-6} \cdot 6.4 \cdot 10^4 [-5 - (-5)]$$

$$\sigma - \frac{79736870}{\sigma^2} = -178.59$$

$$\sigma = 499.1 \quad МПа$$

Стрела провеса для этого режима

$$f = \frac{4.71 \cdot 10^{-2} \cdot 300^2}{8 \cdot 499.1} = 1.6 \quad м$$

Проведем аналогичные расчеты для ACCR:

1. $f = 11.7 \quad м$
2. $f = 0.6 \quad м$
3. $f = 0.33 \quad м$

Для провода АС:

1. $f = 12.57 \quad м$
2. $f = 2.9 \quad м$
3. $f = 1.1 \quad м$

Таблица 1

Марка провода	Режим работы	Стрела провеса, м
АССС 240/28	1	12.38
	2	2.88
	3	1.6
ACCR TW 477-T16 (242/39)	1	11.7
	2	0.6
	3	0.33
АС 240/39	1	12.57
	2	2.9
	3	1.1

Для первого режима работы наихудший показатель стрелы провеса соответствует проводу АС, т.к. при данном режиме определяющей является результирующая удельная нагрузка от веса провода $\gamma_7 = 126097 \quad \frac{H}{м^2}$, наибольшая для данного провода. Лучший показатель стрелы провеса соответствует проводу ACCR с наименьшим показателем $\gamma_7 = 118061 \quad \frac{H}{м^2}$, т.к. композитный сердечник существенно лучше противостоит растяжениям в связи с особенностями технологии металлической матрицы.

Для второго режима работы наихудший показатель стрелы провеса соответствует проводу АС, т.к. при данном режиме определяющей является результирующая удельная нагрузка от веса провода $\gamma_3 = 89436 \quad \frac{H}{м^2}$, наибольшая для данного провода. Лучший показатель стрелы провеса соответствует проводу ACCR с наименьшим показателем $\gamma_3 = 81204 \quad \frac{H}{м^2}$.

Для третьего режима работы наихудший показатель стрелы провеса соответствует проводу АССС, т.к. при данном режиме определяющей является результирующая удельная нагрузка от веса провода $\gamma_6 = 47058 \quad \frac{H}{м^2}$, наибольшая для данного провода это можно объяснить тем, что провод, сердечник которого изготовлен по технологии полимерной матрицы, существенно хуже противостоит пластическим деформациям волокон при изгибах. Лучший показатель стрелы провеса соответствует проводу ACCR с наименьшим показателем $\gamma_6 = 44561 \quad \frac{H}{м^2}$.

Заключение

Проведенный анализ показал, что при наиболее неблагоприятных условиях (первый режим) провод традиционной конструкции существенно уступает по величине стрелы провеса проводам с композитным сердечником соответствующего сечения. Провод марки ACCR показал лучшие свойства и в остальных режимах. Для провода АССС во втором и третьем режиме величина стрелы провеса отличается от АС несущественно.

Уменьшение стрелы провеса позволяет увеличивать длину пролета, что значительно уменьшит стоимость линии за счет экономии на

количестве опор, но т.к. цена проводов с композитным сердечником примерно в 3 раза больше стоимости провода традиционной конструкции, целесообразность применения проводов с композитным сердечником определяется технико-экономическим расчетом для конкретной линии.

Результаты данного расчета будут определяться особенностями местности, климатическими условиями, ландшафтом и т.д.

Список литературы

1. Новые разработки и технологии, повышающие пропускную способность ВЛЭП / Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра» // Обзор новых технологий в энергетике.— 2008.— № 1.— С. 4-7.
2. Колосов, С.В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений/ Колосов С.В., Рыжов С.В. // ЗАО НТЦ «Электросети».
3. Провода АССС алюминиевые с композитным сердечником. Каталог [Электронный ресурс] / ЭНЕРГОкомплект.
4. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергосамиздат, 1989. – 592 с.: ил.

References

1. *New developments and technologies that increase the transmission capacity of high-voltage lines* / Technical Development Department of IDGC of Center, JSC / / Review of new technologies in the power industry, 2008, p. 4-7.
2. Kolosov S.V., Ryzhov S.V. *Increasing the transmission capacity of overhead lines: analysis of technical solutions* / // CJSC STC "Electricity".
3. ACCC aluminum wires with composite core. Catalog [Electronic resource] / ENERGOkomplekt.
4. Idelchik V.I. *Electrical systems and networks* / Textbook for universities. - M .: Energosamizdat, 1989. - 592 p.

УДК.621.311

Модели прогнозирования электрических нагрузок

В.В. Смирнов[1], Е.Ю. Чернова[2], М.А. Старченко[3], Т.С. Максименко[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия,
[1]svadick@mail.ru, [2]nikolenko_katyusha@inbox.ru, [3]warrior2me@gmail.com, [4]tausik.maxy@yandex.ru

Статья поступила 20.11.2018 г.; после доработки 30.11.2018 г.

Аннотация
Модель прогнозирования электрической нагрузки, является одним из инструментов предвидения для принятия управленческих решений при управлении электроэнергетическими системами. Данная статья состоит в построении, оценке и сравнительном исследовании различных моделей прогнозирования электропотребления. Были изучены и проанализированы следующие подходы и методы в прогнозировании: нейросетевой, нейронечеткий.

Ключевые слова: нейросеть, нейронечеткая сеть, нагрузка, модель, прогнозирование.

Approaches to modeling power system loads

V.V. Smirnov[1], K.Yu. Chernova[2], M.A. Starchenko[3] , T.S. Maximenko[4]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]svadick@mail.ru, [2]nikolenko_katyusha@inbox.ru, [3]warrior2me@gmail.com, [4]tausik.maxy@yandex.ru

Received 20.11.2018 y.; received in final form 30.11.2018 y.

Abstract
The electric load forecasting model is one of the foresight tools for making management decisions when managing electric power systems. This article consists in the construction, evaluation and comparative study of various models of power consumption forecasting. The following approaches and methods in forecasting were studied and analyzed: neural network, neuro-fuzzy.

Keywords: neural network, neuro-fuzzy network, load, model, forecasting.

Введение

Для того чтобы управлять, необходимо уметь предвидеть. При управлении электроэнергетическими системами (ЭЭС) одним из инструментов предвидения для принятия управленческих решений является прогнозирование электрической и тепловой нагрузки.

Производителям электроэнергии прогноз ожидаемой нагрузки важен для оптимизации операционных расходов, резервирования мощностей, удобства проведения профилактических работ и обеспечения безопасности систем [1]. Для потребителей прогноз требуется для обеспечения минимизации издержек, в частности, для исключения вероятности простоя производства в случае нехватки необходимой мощности, либо уплаты штрафов при превышении лимитов и переплаты за заказанные, но не полностью израсходованные объемы мощности [2].

В настоящее время изношенность оборудования электростанций составляет от тридцати до семидесяти процентов, в виду этого возросли требования к повышению точности прогноза.

К прогнозированию режимов энергопотребления приходится прибегать в связи с тем, что изменения во времени электрической

нагрузки представляют собой случайные процессы [1], т.е. функции, случайным образом зависящие от дня недели (рабочий день, праздник), времени года, погоды (температура воздуха, степень облачности) и времени суток. Кроме того, все эти зависимости не являются прямыми и не всегда заметны.

Задача прогнозирования уровня электропотребления является одной из первоочередных при планировании работы энергетических объединений. Впоследствии появляется надобность точного предсказания потребления электроэнергии, существенное влияние на которое оказывают метеорологические факторы - температура наружного воздуха, освещенность, влажность, скорость ветра [1]. Планируя графики разного рода параметрам на сутки вперед или неделю, специализированные отделы энергетических объединений решают задачу соотношения между потребностью электроэнергии и средствами решения и выполнения данной задачи. Одним из главных параметров при планировании работы энергетических объединений и электростанций является совокупность прогнозов ожидаемого электропотребления в целом по системе и отдельно взятым потребителям [2]. Точность прогноза потребления электрической нагрузки считается важным фактором для будущего планирования закупок и производства электрической энергии, а также для расчетов электрических режимов. Максимально точно полученные результаты позволяют производить оптимальное с экономической точки зрения распределение нагрузок между потребителями и электростанциями, в следствие это способствует осуществлению экономически благоприятных условий для покупки, транспортировки и продаже электроэнергии. Краткосрочные прогнозы потребления служат фундаментом для формирования диспетчерских графиков. Благодаря этому в одно время определяются и оцениваются необходимые объемы электроэнергии для поставок потребителям и размещения резервных запасов мощности.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является оценка и повышение точности различных методов прогнозирования потребления электроэнергии с целью оптимизировать использование энергоресурсов, также понизить стоимость и повысить надежность электропотребления и транспортировки энергетических ресурсов. Необходимо проанализировать, оценить и сделать выводы по следующим моделям:

1) линейные регрессионные модели;
2) нейросетевые модели;
3) нейронечеткую модель.

Классические методы прогнозирования электропотребления

Прогнозирование электропотребления является основой надежного функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) России. С начала двухтысячных годов в России начал действовать конкурентный сектор оптового рынка электрической энергии.

Функционирование оптового рынка переходного периода основывается на самостоятельном определении покупателями-участниками оптового рынка собственного планового почасового потребления. Для производителей электроэнергии прогноз ожидаемой нагрузки важен для оптимизации операционных расходов, резервирования мощностей, удобства проведения профилактических работ и обеспечения безопасности систем.

Для потребителей прогноз требуется для обеспечения минимизации издержек, в частности, во избежание простоя производства в случае нехватки необходимой мощности, либо уплаты штрафов при превышении лимитов и переплаты за заказанные, но не полностью израсходованные объемы мощности [3].

В 2012 году утвержден национальный стандарт РФ ГОСТ Р ISO 50001 – 2012 – "Системы энергетического менеджмента" [4].

Данный ГОСТ учреждает и уточняет требования к разработке и улучшению системы энергетического менеджмента, целью которой является предоставление организации возможности реализации систематического подхода в достижении постоянного улучшения энергетической результативности, включая энергетическую эффективность, использование и потребление энергии [4].

Согласно установленным государственным нормативам энергетическая политика в управлении энергетическими системами должна обеспечивать непрерывное улучшение энергетических параметров.

Для достижения эффективности функционирования электроэнергетических систем одним из важных параметров является точность прогнозирования потребляемой нагрузки.

Задача прогнозирования формулируется следующим образом: зная предыдущие l значе-

ний временного ряда $x(t)$ предсказать последующее значение

$$x(l+d) = ш(x(t),...,x(t-l),(з_1, з_2,...,з_q),$$

где d – шаг прогнозирования, q – количество независимых переменных η [3].

Метод аналитического прогнозирования: прогнозирующее аналитическое выражение

$$ш(x,t) = \sum_{r=1}^{R} з_r x_r(q,t)$$

где x_r (q, t) – базовые выражения, составляющие основу прогнозирующей формулы;

η_r – дополнительные корректирующие коэффициенты (плотность зимнего (летнего) суточного графика нагрузки, летнего снижения графика нагрузки по отношению к зимнему, годового роста нагрузки);

$r = 1, ..., R$ – степень базовых выражений.

Недостатки: сложность корректировки результатов при поступлении текущих данных; большой объем вычислительных процедур при определении прогнозных значений параметров аналитических выражений.

В настоящее время наблюдается значительное различие справочных и реальных графиков нагрузки, поэтому для повышения точности прогноза целесообразно использовать статистические модели прогнозирования или системы прогнозирования искусственного интеллекта (нечеткие и нейросетевые) [3]. Статистические методы прогнозирования: модели скользящего среднего, авторегрессионная модель со скользящим средним, авторегрессионная модель с интегральным скользящим средним, регрессионные модели. Недостатки: необходимость наличия представительного объема обучающей выборки; необходимость наличия математического описания процесса.

Регрессионный анализ наиболее употребителен в сравнении с другими методами многомерного анализа. Он используется для широкого класса задач, связанных преимущественно с построением математической модели объекта, его идентификацией. При постановке задачи подбора модели для описания закономерностей в объекте различают три характерные ситуации:

1. Структура или тип модели известны, выборочные данные используются для оценивания коэффициентов — параметров модели.
2. Для описания исследуемого объекта может быть использовано несколько моделей; требуется выбрать лучшую из них и оценить ее параметры.
3. Модель изучаемого объекта заранее неизвестна; требуется по выборочным данным наилучшим образом подобрать некоторое описание, гипотеза о структуре которого может быть выдвинута в эксперименте.

Первые две ситуации являются достаточно определенными и могут быть решены при различных стратегиях организации выборочных данных. Относительно решения задачи в условиях неопределенности модели невозможно дать однозначный ответ. Главная трудность состоит в выдвижении реалистичной гипотезы относительно предполагаемой структуры модели. Опыт показывает, что нереалистичность гипотезы приводит к неработоспособной модели, подобранной по выборочным данным.

Гипотеза относительно структуры модели должна выдвигаться на основании возможно большей априорной информации о природе процессов, происходящих в объекте.

Только после того как будет определена размерность задачи, выбраны независимые переменные, определяющие закономерности и зависимости в объекте, выяснен предполагаемый тип линейности модели (по параметрам, 14 по переменным) и оценена возможность внесения искусственных воздействий в объекте, можно обращаться к стратегии пассивного эксперимента, основу которого составляет регрессионный анализ.

Пусть требуется подобрать модель изучаемого объекта, по данным собранным в режиме его нормального функционирования, в виде некоторой функции $з(X_1, X_2 ... X_k)$ от входных переменных X_i. В этих условиях на основании существующих знаний об объекте целесообразно выяснить реальность представления этой функции как гладкой и непрерывной. Если такая возможность для объекта существует, то в качестве модели могут быть выбраны различной длины отрезки степенного ряда Тейлора, получаемого при разложении гладкой и непрерывной функции, в окрестности исходной точки, в пространстве входных переменных. Например, для трех переменных функция может иметь вид $з = в_1 X_1 + в_2 X_2 + в_3 X_3$ линейного полинома или, в зависимости от длины отрезка ряда, полиномов более высоких порядков:

$$з = в_1 X_1 + в_2 X_2 + в_3 X_3 + в_{12} X_1 X_2 +$$
$$+ в_{13} X_1 X_3 + в_{23} X_2 X_3 +$$
$$+ в_{12} X_1 X_2 X_3 + ...,$$

Здесь коэффициенты полинома являются частными производными при соответствующих

функциях независимых переменных ряда Тейлора, например

$$в_3 = \partial з / \partial X_3, в_{23} = \partial з^2 / \partial X_3 X_3, \text{ и т. д.}$$

Построение модели множественной регрессии сводится к нахождению регрессионных коэффициентов на основе данных, которые имеются об объекте прогноза и факторов, которые влияют на прогноз. Таким образом, регрессионные методы могут учитывать влияние широкого набора параметров на выходную прогнозную величину электропотребления. Однако достаточно сложной является проблема выбора независимых влияющих факторов (предикторов). Все это приводит к довольно сложной реализации многофакторных регрессионных прогнозных моделей электропотребления.

Нейросетевой подход прогнозирования электропотребления

Под нейронными сетями подразумеваются вычислительные структуры, которые моделируют простые биологические процессы, чаще всего они ассоциируются с процессами человеческого мозга.

Вышеназванные сети представляют собой распределенные и параллельные системы, способные к адаптивному обучению путем анализа положительных и отрицательных влияний.

Наименьшей и простой рабочей единицей в данных сетях является нейрон, который имеет аналогию с биологическим прообразом.

«Нейрон состоит из элементов трех типов: умножителей, сумматора и нелинейного преобразователя.

Умножители осуществляют связь между нейронами и умножают входной сигнал на число, которое характеризует силу связи.

Сумматор выполняет сложение сигналов, которые поступают по синаптическим связям от других нейронов и внешних входных сигналов. Нелинейный преобразователь реализует нелинейную функцию одного аргумента – выхода сумматора.

Эта функция называется функцией активации или передаточной функцией нейрона. Нейрон в целом реализует скалярную функцию векторного аргумента» [5].

Математическая модель нейрона:

$$S = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b,$$

$$y = f(s),$$

где w_i – вес (weight) синапса, $i = 1 \ldots n$;

b – значение смещения (bias),

s – результат суммирования (sum);

x_i – компонент входного вектора (входной сигнал), $i = 1 \ldots n$;

y – выходной сигнал нейрона;

n – число входов нейрона;

f – функция активации.

«Входной сигнал, весовые коэффициенты и смещение могут принимать действительные значения, но во многих практических задачах они принимают лишь некоторые фиксированные значения. Выход *(y)* определяется видом функции активации и может быть как действительным, так и целым. На входной сигнал *(s)* нелинейный преобразователь отвечает выходным сигналом *f(s)*, который представляет собой выход y нейрона.

Примеры активационных функций представлены в таблице 1.» [5].

***Таблица 1**. Функции активации нейронов*

Название	Формула	Область значений
Линейная	$f(s) = ks$	$(-\infty,+\infty)$
Логическая	$f(s) = \dfrac{1}{1+e^{-as}}$	$(0,+\infty)$
Экспоненциальная	$f(s) = e^{-as}$	$(0,+\infty)$
Синусоидальная	$f(s) = \dfrac{s}{a+\lvert s\rvert}$	$(-1,+1)$

«ИН – элементарный преобразующий элемент, имеющий r^n-вектор входа, суммирующий блок, блок преобразования сигнала с помощью функции активации, скалярный выход q. Каждый вход r_i имеет весовой коэффициент W_i, соответствующий силе биологической «синоптической» связи. Весовые коэффициенты настраиваются в процессе обучения. Положительные весовые коэффициенты соответствуют так называемым возбуждающим связям, а отрицательные – тормозящим. В зависимости от величины весовых коэффициентов, сигналы, передаваемые по сети, могут увеличиться или уменьшиться» [5]. Дополнительно вводится вход r_0 с коэффициентом w_0, чтобы обеспечить смещение (сдвиг) ИН. Как правило, $r_0 = 1$ (рисунок 1, а, б).

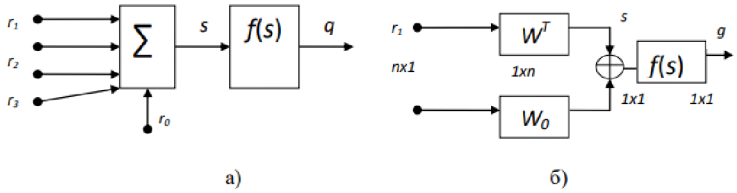

Рис.1. Модель искусственного нейрона.

Таким образом, ИН осуществляет преобразование входного вектора r_n в скаляр q. ИН функционирует в 2 этапа.

Можно выделить три основных типа нейронных сетей: полносвязные, многослойные или слоистые, слабосвязные. «В многослойных нейронных сетях нейроны объединяются в слои. Слой содержит совокупность нейронов с едиными входными сигналами. В общем случае сеть состоит из Q слоев, пронумерованных слева направо. Внешние входные сигналы подаются на входы нейронов входного слоя (нулевого), а выходами сети являются выходные сигналы последнего слоя. Кроме входного и выходного слоев в многослойной нейронной сети есть один или несколько скрытых слоев» [5]. В свою очередь, среди многослойных нейронных сетей выделяют следующие типы.

1) Монотонные. Это частный случай слоистых сетей с дополнительными условиями на связи и нейроны.

2) Сети без обратных связей. В таких сетях нейроны входного слоя получают входные сигналы, преобразуют их и передают нейронам первого скрытого слоя, и так далее вплоть до выходного, который выдает сигналы для интерпретатора и пользователя. Среди многослойных сетей без обратных связей различают полносвязанные и частично полносвязанные. Классическим вариантом слоистых сетей являются полносвязанные сети прямого распространения.

3) Сети с обратными связями. В сетях с обратными связями информация с последующих слоев передается на предыдущие.

Нейронечеткий подход прогнозирования электропотребления

«Основная привлекательность использования систем с нечеткой логикой состоит в возможности построения математической модели для сложных процессов, когда такая модель не может быть получена каким-то другим (стандартным) путем. Теоретически наиболее успешные прогнозы могут быть выполнены в том случае, если существует адекватная математическая модель объекта. Но попытки применить нечеткую математику и нечеткую логику к построению (идентификации) математической модели не всегда оказываются успешными, так как априори накладывается ограничение на структуру модели в связи с необходимостью формализации и сжатия знаний, в связи с чем путем ограничения уменьшается величина входных переменных. Кроме того, к недостаткам нечетких систем можно отнести отсутствие обучения и, как следствие, невозможность использования данных измерения для модификации модели. К достоинствам систем с нечеткой логикой можно отнести возможность оперировать опытом экспертов в данной области и возможность получения модели сложной системы в виде нечетких правил, что влияет интерпретируемость выводов, которые получаются с помощью этих нечетких правил. Важно упомянуть то, что модели с нечеткой логикой и ИНС практически идентичны, но у обоих методов есть плюсы и минусы. В нейронечетких моделях выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, однако некоторые схожие функции принадлежности подстраиваются с применением методов обучения ИНС

Перспективной особенностью нейронечеткого подхода в задачах прогнозирования является возможность получения достоверных результатов при значительных искажениях входной (исходной) информации. Подобные результаты можно получить, применяя прогнозирующие модели на нейронных сетях. Преимущества нейронечетких сетей: наличие качественных знаний, допускающих логический анализ, простота обнаружения ошибок» [6].

Реже для прогнозирования нагрузки используется нечеткая логика, т.к. для построения нечетких правил требуется эксперт в данной области. Чаще предсказания, сделанные экспертом базируются на субъективной оценке процессов, происходящих в энергосистеме, причем

эта оценка носит скорее интуитивный характер.

Чтобы реализовать и структурировать базы нечетких правил требуется априорное выявление закономерностей, описывающих данный процесс, что для больших систем бывает достаточно сложно. Кроме того, при описании процессов экспертом неизбежна потеря информации в силу субъективного фактора. Поэтому чаще предлагается некоторая методика, основанная на нечетких алгоритмах или сочетание с нейросетевым подходом. Например, использование нечеткого классификатора, исходя из погодных условий, выбирающего для прогнозирования одну из сорока восьми ИНС для дальнейшего прогнозирования нагрузки. Эффективность нейронечеткого подхода выше, чем при использовании ИНС. Уменьшение погрешности прогноза объясняется способностью ННС гладкой аппроксимации пороговых функций и "нечетким" способом представления данных в сети.

Четкие входные векторы данных принадлежат нескольким нечетким множествам сети. В ННС, обученной с помощью алгоритма самоорганизации, выполняется нечеткое группирование данных путем приведения их к различным центрам кластеров. В результате каждый вектор x представляется множеством центров, причем влияние каждого из них на значение вектора различно и зависит от значения функции принадлежности. Благодаря этому становится возможным лучшее и более точное отображение использованных при обучении исходных данных и, тем самым, повышение точности прогнозирования.

К достоинствам нейронечетких подходов прогнозирования относится: нечувствительность к недостатку априорной информации; возможность прогнозирования не наблюдавшихся ранее событий; наличие строгой формализации и алгоритмизации методик прогнозирования; допустимость учета старения информации (принцип непрерывности прогнозирования); возможность решения слабо формализованных задач; возможность аппаратной реализации методик.

Заключение

1. На основании международных требований к системам прогнозирования электропотребления с целью увеличения уровня надежности электроснабжения и повышения уровня функционирования электроэнергетических систем как единого комплекса, а также оптимизации нагрузки изношенных электрических носителей и сетей, целесообразно использовать при прогнозировании электропотребления, наряду с существующими, технологии на основании нейронных сетей и алгоритма опорных векторов.

2. В качестве обосновании выбора указаны основные отличия нейросетевого подхода: • возможность использования малых обучающих выборок, не обеспечивающих получение статистически достоверных результатов классическими методами; • возможность определения верного решения задачи при наличии неполноценных и искаженных исходных данных; • вероятность учета различных дополнительных факторов, которые оказывают воздействие на качество прогнозирования.

Нейронечеткие и нейронные сети – универсальные аппроксиматоры. Преимуществом нечетких моделей является наличие качественных знаний, которые допускают логический анализ, и простота обнаружения ошибок. Ограничение использования нечетких систем: при наличии более пяти входов реализация систем очень сложная, исходя из этого точность решения становится меньше. Для объектов с большим числом входов необходимо использовать нейронные сети. Преимуществом нейронных сетей служит возможность формирования большого числа входов. Нейронные сети обладают "голографичностью" – сохранением свойств сетей при удалении определенной части сети в силу полной связности и большого числа искусственных нейронов. Недостатком нейронных сетей является некоторая сложность поиска ошибки или неисправности.

Список литературы

1. Волков Э. П. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики в России / Э.П. Волков, В.А. Баринов, А.С. Маневич. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 350 с.
2. Большов, Л. А. Прогнозирование электропотребления: современные подходы и пример исследования / Л.А. Большов, М. Ф. Каневский, Е. А. Савельева // Изв. АН. Энергетика. - 2004. - № 6. - С. 25-35.
3. Богатырев, Л.Л. Диагностирование энергетической безопасности и надежности топливо- и энергоснабжения методами теории нечетких множеств/ Л.Л. Богатырев, А.А. Куклин, П.Е. Мызин // Изв. АН Энергетика. - 2004. - № 4. - С. 18-27.
4. ГОСТ Р ИСО 50001-2012 "Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению". [Электронный ресурс]/ Режим

доступа: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-50001-2012 (дата обращения: 17.03.2016).
5. Круглов, В. В., Борисов, В. В. Искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. - 382 с.
6. Поляхов Н. Д., Приходько И. А. Нечеткие системы управления: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2003 - 48 с.

References

1. Volkov, EP Problems and Prospects for the Development of the Electric Power Industry in Russia / E.P. Volkov, V.A. Barinov, A.S. Manevich. - M .: Energoatomizdat, 2001. - 350 p.
2. Bolshov, L. A. Prediction of electricity consumption: modern approaches and an example of research / L.A. Bolshov, M. F. Kanevsky, E. A. Save-liev // Izv. An. Energy. - 2004. - № 6. - p. 25-35.
3. Bogatyrev, L.L. Diagnosis of energy safety and reliability of fuel and energy supply by methods of the theory of fuzzy sets / LL. Bogatyrev, A.A. Kuklin, P.E. Myzin // Izv. AN Energy. - 2004. - № 4. - p. 18-27.
4. GOST R ISO 50001-2012 "Energy management systems. Requirements and application guidelines." [Electronic resource] / Access mode: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-50001-2012 (access date: 03/17/2016).
5. Kruglov, V. V., Borisov, V. V. Artificial neural networks / V.V. Kruglov, V.V. Borisov. - M .: Hotline - Telecom, 2001. - 382 p.
6. 9. Polyakhov N. D., Prikhodko I. A. Fuzzy control systems: studies. allowance. SPb .: Publishing house of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2003 - 48 p.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК – 620.92

Об изотопном составе водорода и его трансформации в полях тепловых нейтронов в активных зонах реакторов типа ВВЭР

П. А. Пономаренко[1], М. А. Фролова[2], И. Г. Тананаев[3], Ю. С. Чичерина[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]ppa4493@gmail.com, [2] frolova-85@mail.ru, [3]geokhi@mail.ru, [4]chicherinajulia@mail.ru

Статья поступила 23.10.2018 г.; после доработки 29.10.2018 г.

Аннотация

Статья посвящена рассмотрению качественного и количественного состава образующихся радионуклидов при облучении ядер водорода, входящего в состав воды первого контура водо-водяного энергетического реактора тепловыми нейтронами и оценке скорости образования радионуклида водорода - трития, опасного для объектов биосферы.

Ключевые слова: энергетика, анализ, ядерные реакции, анализ активации, теплоноситель, активная зона, первый контур, тритий, тепловые нейтроны, ВВЭР.

The isotope composition of hydrogen and its transformation in the fields of thermal neutrons in the active zones of the VVER-type reactors

M. A. Frolova[1], P. A. Ponomarenko[2], I. G. Tananaev[3], Y.S. Chicherina[4]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia [1]ppa4493@gmail.com, [2] frolova-85@mail.ru, [3]geokhi@mail.ru, [4]chicherinajulia@mail.ru

Received 23.10.2018 y.; received in final form 29.10.2018 y.

Abstract

The article is devoted to the consideration of qualitative and quantitative composition of formed radionuclides under irradiation of hydrogen nuclei, which is a part of the water of the first circuit of the water-water power reactor, thermal neutrons and evaluation of the rate of formation of hydrogen radionuclide tritium, dangerous to the objects of the biosphere.

Keywords: energy, analysis, nuclear reactions, activation analysis, coolant, active zone, first circuit, tritium, thermal neutrons, VVER.

Введение

Вода, как самый мощный источник водорода на Земле, широко и в больших количествах распространена в природе [5,7,8]:

- *71%* поверхности Земли покрыто водой;
- биосфера Земли содержит *1130* км^3 воды;
- в атмосфере Земли постоянно находятся *12700* км^3 воды;
- в теле стандартного человека (масса *70* кг, рост *170* см) вода составляет *65 – 70* % его массы.

Кроме этого чистый газ водород находится в атмосфере Земли в количестве $3{,}5\cdot10^{-6}$ % от массы атмосферы, что составляет $1{,}75\cdot10^{8}$ т.

Водород имеет высокое эффективное сечение рассеивания для нейтронов реакторного спектра, равное σ_S^H = *38* барн (σ_S^C = *4,8* барн, $\sigma_S^{тяж.воды}$ = *10,5* барн). Поэтому это сечение является основополагающим и для σ_S^{H2O}. Сечение рассеяния для таких нейтронов у обычной воды составляет σ_S^{H2O} = *46* барн.

Вот почему обычная вода, как среда, содержащая большое количество водорода, широко распространённая в природе, легкодоступна, и хорошо изучена, является хорошим замедлителем нейтронов и широко используется в реакторах ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Замедляющая способность, как основной параметр, характеризующий замедлитель, оценивается выражением:

$$\sigma_S^{тяж.воды}\cdot N_{тяж.воды}\cdot\xi_{тяж.воды}$$

где: N – число ядер (молекул) в 1 см^3;
ξ – средний логарифмический декремент потери энергии нейтрона при одном столкновении с атомным ядром среды (справочная величина):

$$\xi=\ln\frac{E_{нейтр.}^{до\ столкн.}}{E_{нейтр.}^{после\ столкн.}}\ [н],$$

где: E – энергия.

Замедляющая способность воды самая высокая среди всех применяемых замедлителей и составляет 1,46 см$^{-1}$. Для сравнения замедляющая способность углерода составляет 0,061 см$^{-1}$, а тяжелой воды – 0,2 см$^{-1}$.

Обычная вода является и хорошим теплоносителем. Её теплоёмкость при обычных условиях (давлении *760* мм рт.ст. и температуре *20*°С) составляет Cp^{H2O}=4,19 $\frac{кДж}{кг\cdot градус}$[10].

Для сравнения:

$Cp^{\frac{н}{стали}}$=0,5 $\frac{кДж}{кг\cdot градус}$; Cp^{Al}=4,19 $\frac{кДж}{кг\cdot градус}$;
Cp^{Zr}=0,29 $\frac{кДж}{кг\cdot градус}$; Cp^{Hg}=0,14 $\frac{кДж}{кг\cdot градус}$;
Cp^{Pb}=0,125 $\frac{кДж}{кг\cdot градус}$.

Именно поэтому обычная вода используется и в качестве теплоносителя в первом контуре [2], и является постоянной составляющей активной зоны исследовательских водо-водяных и энергетических реакторов типа ВВЭР.

Следовательно, вода постоянно подвергается воздействию нейтронов тепловой энергии (*0,001 – 0,5* эВ [6]) высокой интенсивности (большой плотности потока нейтронов (10^{13} – 10^{14} $\frac{н}{см^2\cdot с}$), в результате которого могут генерироваться радионуклиды – загрязнители атмосферы, гидросферы, а также радионуклиды природных химических элементов, важных составляющих представителей объектов биосферы и, в частности, человека.

Данная статья и посвящена рассмотрению качественного и количественного состава образующихся радионуклидов при облучении ядер водорода, входящего в состав воды, тепловыми нейтронами и оценке скорости образования радионуклида водорода трития, в принципе опасного для объектов биосферы.

Постановка задачи

Природный водород, входящий в состав воды, состоит из двух стабильных изотопов водорода: *99,985*% ^1_1H, ядро которого состоит из одного протона, и *0,015*% дейтерия (^2_1H или Д), ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона [4]. Очень редко в природе встречается третий изотоп водорода тритий (^3_1H или Т), ядро которого состоит из одного протона и двух нейтронов. Тритий радиоактивен с периодом полураспада $T_{0,5}$=*12,262* года [6], является чистыми бета излучателем, максимальная энергия бета частиц составляет *0,018* МэВ, средняя – *0,006* МэВ.

Водород, а, следовательно, его изотоп тритий в составе природной пропорции входит в состав всех биотканей. При нахождении трития в составе биоткани, его бета частицы, как продукт распада, облучают соседние нормально функционирующие биомолекулы, и путем ионизации разрушает их нормальные связи. В результате в клетке, состоящей из биомолекул, наступает поломка, и клетка перестает нормально функционировать. Создаются условия для зарождения и развития болезнетворных клеток.

Эффективная энергия бета частиц трития согласно Международным Рекомендациям по предельно-допустимым дозам внутреннего облучения (1960г.) составляет *0,01* МэВ на распад, которая представляет собой величину полной энергии, ушедшей на разрушение связей в нормальных молекулах биоткани [5].

В условиях Земли на 10^{18} ядер водорода до испытания ядерного и термоядерного оружия приходилось примерно одно ядро трития (это была природная пропорция), а масса всего трития в условиях Земли составляла примерно *3* кг, его активность была около *30* МКи. *93%* этого

трития находились в гидросфере, *7%* - в воздухе [1]. Но проводившиеся в 1954-1958 гг. и в 1961-1962 испытания ядерного и термоядерного оружия (это были пики испытаний) увеличили содержание трития более чем в *100* раз, так взрыв одного ядерного боеприпаса мощностью в *1*Мт тротила увеличивал земную природную активность трития на *7,03* кКи, а взрыв одного термоядерного боеприпаса в *1* Мт – на *20*МКи [3].

Физические модели, дающие качественную картину трансформации ядер водорода, взаимодействия протия, дейтерия и трития с тепловыми нейтронами, имеют вид:

$$ {}_1^1H + {}_0^1н_т \xrightarrow{{}_1^1H\sigma_a=332\ мбарн} {}_1^2H $$

$$ {}_1^2H + {}_0^1н_т \xrightarrow{{}_1^2H\sigma_a=0{,}46\ мбарн} {}_1^3H, $$

Где: σ_a - эффективное микроскопическое поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов соответствующим ядром, барн;

${}_0^1н_т$ - обозначение теплового нейтрона.

Математические модели, дающие количественную картину трансформации ядер, составленные по приведенным физическим моделям, имеют вид:

$$ \begin{cases} \frac{dN_{H-1}}{dt} = -\sigma_a^{H-1} \cdot N_{H-1} \cdot \varphi_{н.т} & (1) \\ \frac{dN_{H-2}}{dt} = -\sigma_a^{H-1} \cdot N_{H-1} \cdot \varphi_{н.т} - \sigma_a^{H-2} \cdot N_{H-2} \cdot \varphi_{н.т} & (2) \\ \frac{dN_{H-3}}{dt} = -\sigma_a^{H-2} \cdot N_{H-2} \cdot \varphi_{н.т} - \sigma_a^{H-3} \cdot N_{H-3} \cdot \varphi_{н.т} - N_{H-3} \cdot \lambda_{H-3} & (3) \end{cases} $$

Где: N_{H-1}, N_{H-2}, N_{H-3}– соответственно, содержание (концентрация) ядер протия, дейтерия и трития в *1* $см^3$ рассматриваемого вещества (чистый водород, вода, метан, биоткань и др.);

σ_a^{H-1},σ_a^{H-2},σ_a^{H-3}-соответственно, эффективные микроскопические сечения поглощения тепловых нейтронов ядрами протия, дейтерия и трития, $см^2$;

$\varphi_{н.т}$-плотность потока тепловых нейтронов, $\frac{Н}{см^2 \cdot с}$;

$\frac{dN_{H-1}}{dt}$, $\frac{dN_{H-2}}{dt}$, $\frac{dN_{H-3}}{dt}$-соответственно, скорости изменения концентрации ядер протия, дейтерия и трития в нейтронном поле, $\frac{ядер}{см^3 \cdot с}$;

λ_{H-3}-постоянная распада трития, равная $1{,}79 \cdot 10^{-9}$ $с^{-1}$.

Анализ моделей

Различие в микроскопических сечениях поглощения протия и дейтерия составляет около трех порядков, сечение поглощения ядром трития теплового нейтрона в доступных авторам справочниках отсутствует.

Скорость убыли концентрации протия пропорционально произведению

$$ N_{H-1} \cdot \varphi_{н.т} $$

$\varphi_{н.т}$изменяется, как правило, в пределах $10^{13} - 10^{14}$ $\frac{Н}{см^2 \cdot с}$. N_{H-1}для воды составляет (используем формулу Авогадро):

$$ N_{H-1}^{H2O} = X \frac{N_a}{M} \cdot \rho^{H2O} = 2 \cdot 0{,}9985 \cdot \frac{N_a}{18} \cdot 1 = 6{,}7 \cdot 10^{22} \frac{ядер}{см^3} $$

Где: N_a – постоянная Авогадро;

M – молярная масса;

ρ^{H2O} – плотность воды.

В принципе число ядер протия в объеме воды N_{H-1}^{H2O} зависит от плотности воды, которая в энергетических реакторах ВВЭР изменяется от *1* $\frac{г}{см^3}$(для холодного реактора) до *0,7* $\frac{г}{см^3}$ (для работающего на мощности реактора) [10]. После подстановки всех величин в формулу (1) скорость изменения концентрации ядер протия в I контуре ВВЭР будет иметь порядок 10^{12} $\frac{ядер}{см^3 \cdot с}$, а это согласно (2) скорость генерации дейтерия. Изменение же концентраций ядер протия в воде во времени в нейтронном поле тепловых нейтронов при плотности потока $\varphi_{н.т}$ будет иметь вид:

$$ N_{H-1}^{H_2O}(t) = N_{H-1_0}^{H_2O} \cdot e^{-\sigma_a^{H-1} \cdot \varphi_{н.т} \cdot t_{обл}} $$

Анализ формулы (2) показывает, что, $\sigma_a^{H-1} > \sigma_a^{H-2}$ примерно на три порядка, а начальные концентрации ядер ${}_1^1H$ и ${}_1^2H$ отличаются на четыре порядка, можно считать, что скорость генерации дейтерия больше скорости его убыли примерно на семь порядков. Действительно скорость генерации Д составляет $1{,}11 \cdot 10^{12}$ $\frac{ядер}{см^3 \cdot с}$, скорость убыли – $1{,}8 \cdot 10^5$ $\frac{ядер}{см^3 \cdot с}$.

Следовательно, концентрация дейтерия в теплоносителе-замедлителе реактора типа ВВЭР только растет со скоростью примерно $1{,}11 \cdot 10^{12}$ $\frac{ядерД}{см^3 \cdot с}$. Скорость образования трития в Iконтуре ВВЭР растет со скоростью $2{,}5 \cdot 10^5$ $\frac{ядерТ}{см^3 \cdot с}$. Скорость убыли трития, даже если допустить, что $\sigma_a^T = 100$ барн, что невероятно, составит примерно $5 \cdot 10^{-4}$ $\frac{ядер}{см^3 \cdot с}$. Значит, количество

трития в I контуре ВВЭР всё-таки тоже будет расти со скоростью порядка $3 \cdot 10^5 \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$.

Таким образом, все работающие ВВЭР России в год, могут генерировать вполне определённое количество ядер трития. Оценка этого количества должна производиться с учетом особенностей генерации трития в I контуре ВВЭР, которые заключаются в следующем: нейтронное поле есть только в активной зоне, во всех остальных элементах первого контура нейтронные поля по сравнению с нейтронными полями в активной зоне ($\varphi_{АЗ} = 10^{13} - 10^{14} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$) практически отсутствуют, и генерацией трития в ней можно пренебречь. Следовательно, тритий согласно (3) генерируется только когда теплоноситель (H_2O) находится в активной зоне.

Обозначим время пребывания теплоносителя в активной зоне через $t_{АЗ}$, а время одного цикла прохождения теплоносителя по контуру – $t_к$.

Тогда образовавшееся количество трития в результате первого цикла прохождения теплоносителя через активную зону в течение всей последующей работы реактора, будет только распадаться. Пополнение трития в теплоносителе будет производиться только за каждый очередной цикл активации дейтерия в активной зоне. С учетом рассмотренных особенностей накопления трития в I контуре ВВЭР за всё время работы с одной загрузкой ядерного топлива, выражение для его активности этого трития приведено в [11] и имеет вид:

$$A_T = \frac{dN_{H\text{-}3}}{dt} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{H\text{-}3} t_к}\right) \cdot e^{-\lambda_{H\text{-}3} t_к} \cdot \left[\frac{1 - e^{-(n-1)\lambda_{H\text{-}3} t_к}}{1 - e^{-\lambda_{H\text{-}3} t_к}}\right] \frac{\text{Бк}}{\text{см}^3} \quad (4)$$

Где: A_T - активность образовавшегося трития в 1 см^3 теплоносителя реактора типа ВВЭР за 10 месяцев работы на полной мощности, $\frac{\text{Бк}}{\text{см}^3}$;

$\frac{dN_{H\text{-}3}}{dt}$ – первое слагаемое уравнения (3) для соответствующей реакторной установки, $\frac{\text{ядер}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$;

$n = \frac{10 \text{ месяцев}}{t_к}$ – безразмерное время работы соответствующей реакторной установки, но полной мощности;

Для оценки $t_{АЗ}$ и $t_к$ воспользуемся основными физико-техническими характеристиками реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 [12].

Тогда упомянутые времена будут иметь следующие значения:

- время прохождения теплоносителя через активную зону реактора типа ВВЭР-440 $t_{АЗ}^{ВВЭР\text{-}440} = 0{,}6$ с; $t_к^{ВВЭР\text{-}440} = 18$ с;
- время прохождения теплоносителя через активную зону реактора типа ВВЭР-1000 $t_{АЗ}^{ВВЭР\text{-}1000} = 0{,}7$ с; $t_к^{ВВЭР\text{-}1000} = 14$ с.

Подставив соответствующие величины в (4) для ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, получим удельную активность ($\frac{\text{Бк}}{\text{см}^3}$) теплоносителя, создаваемую тритием, для соответствующей реакторной установки за 10 месяцев её работы на полной мощности.

$$A_{уд}^{ВВЭР\text{-}440} = 467 \frac{\text{Бк}}{\text{см}^3};$$

$$A_{уд}^{ВВЭР\text{-}1000} = 1116 \frac{\text{Бк}}{\text{см}^3}$$

Общая активность воды I контура соответствующей реакторной установки, создаваемой тритием, составит:

$A_{уд}^{ВВЭР\text{-}440} = 9{,}34 \cdot 10^{10}$ Бк, что составляет $8{,}4 \cdot 10^{-10}$ % от природной активности трития на Земле.

$A_{уд}^{ВВЭР\text{-}1000} = 3{,}34 \cdot 10^{11}$ Бк, что составляет $3 \cdot 10^{-9}$ % от природной активности трития на Земле.

В выполненных оценках снижение активности трития за *10* месяцев работы реакторной установки не учитывалось, т.к. период полураспада трития составляет *12,3* года.

Таким образом, при соблюдении всех мер безопасности на АЭС при обращении с радиоактивной водой первого контура, создаваемой тритием, получаемым путем трансформации природного водорода в первом контуре в нейтронном поле реакторных установок типа ВВЭР, величина такой активности не представляет серьезной опасности для окружающей среды.

Список литературы

1. Филипов Е. М. «Радиационная экология». Севастополь, 2003г.
2. Тевлин С. А. «АЭС с реакторами ВВЭР-1000», Издательский дом МЭИ. — М:,2008 г.
3. Козлов В. Ф. «Справочник по радиационной безопасности», Энергоатомиздат, — М:,1991г.
4. Гордеев И. В. и др. «Справочник по ядерно-физическим константам для расчета реакторов», Изд. Гос.комитета СМ СССР по использованию атомной энергии, — М:,1960 г.
5. Закутинский Д. И. и др. «Справочник по токсикологии радиоактивных изотопов», Гос. Изда-

тельство медицинской аппаратуры, — М:,1962 г.
6. Справочник по ядерной физике под редакцией академика Арцимовича А. А., Госиздат физ-мат литературы, — М:,1963 г.
7. Дерпгольц В. Ф. «Мир воды», Издательство «Недра», — Л:,1979 г.
8. Тельдеши Ю. и др. «Диагностика окружающей среды радиоаналитическими методами», Энергоатомиздат, — М:,1985 г.
9. Овчинников Ф. Я. и др. «Эксплуатационные режимы ВВЭЯР», Атомизат, — М:, 1977 г.
10. Чиркин В. С. «Теплофизические и ядерные свойства материалов, применяемых в реакторостроении», ВМФ, 1967 г.
11. Барабанов С. А., Залевский П. И., Пономаренко П. А. «Основы радиационной безопасности», ВМФ, 1973 г.
12. Семёнов В.В. «Основные физико-технические характеристики реакторных установок ВВЭР», ИАЭ им. И. В. Курчатова. — М:,1979 г.
13. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. — М: Атомиздат,1971.

References

1. Filipov, E. M. "Radiation ecology". Sebastopol, 2003.
2. Tevlin S. A. "NPP with VVER-1000 reactors", Publishing house MEI, Moscow,2008
3. Kozlov, V. F., "Handbook of radiation safety", Energoatomizdat, Moscow,1991.
4. Gordeev I. V. et al. "Handbook of nuclear-physical constants for reactor calculation", Ed. State.Committee of the USSR for the utilization of atomic energy, Moscow, 1960
5. Zakutinsky D. I. et al. "Handbook of toxicology of radioactive isotopes", State. Publishing house of medical equipment, M., 1962
6. Handbook of nuclear physics under the editorship of academician Artsimovich, A. A., state publishing house of physical-mathematical literature, M., 1963.
7. Gerholz, V. F. "water World", Publishing house "Nedra", Leningrad,1979.
8. Caldesi Yu and others, "Diagnosis of the environment, radioanalytical methods", Energoatomizdat, M., 1985.
9. Ovchinnikov, F. Ya., etc. "Operating modes WEAR", led atomizer, M., 1977.
10. Chirkin V. S. "Thermophysical and nuclear properties of materials used in reactor construction", Navy, 1967
11. Barabanov S. A., Zalewski P. I., Ponomarenko, P. A. "Basics of radiation safety", of the Navy, 1973
12. Semenov V. V. "Basic physical and technical characteristics of VVER reactor plants", IAE im. I. V. Kurchatov. M.,1979.
13. Klimov A. N. Nuclear physics and nuclear reactors. M: Atomizdat, 1971

УДК 628.16:537.622

КОНКУРЕНТНАЯ СОРБЦИЯ ПРИ ОЧИСТКЕ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ОТ ИОНОВ МЕДИ, СВИНЦА И ЖЕЛЕЗА

Н.И. Черкашина[1]

[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова 7, г. Севастополь, 299015, Selyanskij-AS@yandex.ru*

Статья поступила 18.10.2018 г.; после доработки 22.10.2018 г.

Аннотация

Получены изотермы конкурентного связывания, определены параметры сорбционных процессов в предельных случаях для низких и высоких концентраций ионов металлов (Co^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Pu^{2+}). Используя математическое описание процесса фильтрации с граничным условиями представленными в программе Delphi7 на примере системы СВО-5 определены оптимальные сорбционные материалы, их возможные комбинации для реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

Ключевые слова: математическое описание, фильтрация, конкурентная сорбция, ионообменные материалы, система СВО-5, очистка жидких сред, ионы тяжелых металлов.

COMPETITIVE SORPTION WHEN CLEANING LIQUID TECHNOLOGICAL MEDIA FROM IONS OF COPPER, LEAD AND IRON

N.I. Cherkashina[1]

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia

[1]selyanskij-as@ya.ru

Received 18.10.2018 y.; received in final form 22.10.2018 y.

Abstract

Competitive binding isotherms are obtained, the parameters of sorption processes in the limiting cases for low and high concentrations of metal ions (Co^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Pu^{2+}) are determined. Using the mathematical description of the filtration process with boundary conditions presented in the Delphi7 program on the example of the SWC-5 system, the optimal sorption materials, their possible combinations for the implementation of various tasks in the sorption wastewater treatment are determined.

Keywords: mathematical description, filtration, competitive sorption, ion-exchange materials, system SWC-5, cleaning of liquid media, heavy metal ions.

Введение

Промышленные сточные воды содержат целый ряд чрезвычайно токсичных примесей, но наиболее опасны для окружающей среды ионы тяжелых металлов –ртуть, свинец, кадмий, мышьяк, медь, ванадий, олово, цинк, сурьма, молибден, кобальт, никель и др. В водоподготовке питьевой воды важно обеспечить максимальную полноту извлечения ионов тяжелых металлов [1]. При недостаточной очистке сточных вод ионы тяжелых металлов, попадают в водоемы и подземные горизонты, начинают отрицательно

влиять на обитающие в них растения и организмы, которые накапливаются в них.

Таким образом, проблема очистки промышленных стоков и подготовки воды для технических и хозяйственно-питьевых целей с каждым годом приобретает все большие значение [2].

Разработана программа по результатам исследований работы технологической схемы комплексной установки для очистки сточных вод, которые имеют в своем составе соли тяжелых металлов.

Основным материалом, использующимся в качестве сорбента в настоящее время, являются: катионит КУ-2-8 – это сильнокислотный катионит гелиевой структуры, активная группа – сульфогруппа, размер зерен – 0,315…1,25 мм, полная статическая обменная емкость – 1,8 мг-моль/см^3 , динамическая ем кость – 526 г-моль/м^3 (применяют для разделения и удаления цветных и редких металлов в гидрометаллургии, при очистке оборотных и сточных вод, для регенерации отходов гальванотехники и металлообработки и др.) [3]; анионит АВ-17-8 – это сильноосновный анионит, активная группа – чевертичные триметиламмониевые группы, размер зерен – 0,315…1,25 мм (применяется в гидрометаллургии, для очистки сточных и оборотных вод, в водоподготовке, химической промышленности и др.) [4].

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5 [5].

Эффективность и экономичность извлечения ионов кобальта, свинца, железа и меди ионным обменом зависит от значения pH, от наличия и сконцентрированности ионов железа и кальция, концентрации их в водной среде, от общей минерализации воды.

В очистке многокомпонентных сточных вод со слабой концентрацией применяют большей частью Н-катионирование.

Поскольку большинство ионитов представляют собой твердые тела, ионный обмен имеет сходство с адсорбцией, по этой причине иногда называют ионный обмен ионообменной сорбцией, а иониты – ионнобменными сорбентами [9].

В данной работе был исследован ряд сорбционно-активных материалов:

1) аниониты - АВ-17-8, АВ-17П, Амберлит IRA-458, Вофатит SBW, Варион АТ-660, Дауэкс SBR-(P), Дауэкс MSA-1, Смола Purolite A–860, Тульсион А-72(МП);
2) КУ-2-8, КУ-23, Амберлит IR-120, Тульсион Т-42, Смола DOWEX HCR–S/S, Сорбент АС, АНКБ-35, «Фолиокс-КГО» сорбционные характеристики изучены [6-10].

Приведенные сорбенты можно использовать для очистки водных сред различных промышленных предприятий, в настоящее время их производят в основном из торфа и древесного угля различных марок.

Сорбенты отличаются наличием химически активных групп, которые взаимодействуют с находящимися в растворе ионами металлов с образованием хелатных комплексов.

В некоторых странах разработаны методы получения более дешевых сорбентов из различных отходов, запасы которых ежегодно пополняются, а квалифицированное использование их не превышает 15…20 %.

Математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, рассчитанный коэффициент фильтрации представлен в программе Delphi7 на примере системы СВО-5.

Для определения кинетических параметров сорбции на сорбентов использовали растворы, содержащие ионы Co^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Pu^{2+}, температурные интервалы исследований коэффициента диффузии Д 25…45…60 °С.

Эксперимент

Для приготовления всех растворов использовались реактивы качества не ниже ч.д.а. и бидистиллированная вода.

Необходимую для экспериментов величину pH получали добавлением азотной кислоты.

Перед проведением экспериментов все ионообменные материалы промывали раствором хлорида натрия (10 г/л), а затем бидистиллированной водой до нейтральной величины pH смыва.

Исследование адсорбции ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} на ионообменных материалах проводили в закрытых полипропиленовых конических колбах объемом 250 мл. 0,20-0,50 г сорбентов (в пересчете на сухой вес), заливали 100 мл раствора содержащего равное количество ионов каждого исследуемого металла, при pH 5.00±0.25.

После отделения образца измеряли остаточные концентрации ионов тяжелых металлов в растворе ($C_{i,eq}$).

Концентрация ионов меди и свинца в рабочем растворе составляют: C_{Cu}=0,5-250 мг/л; C_{Cl}=0,5-60 мг/л.

В диапазоне получены значения остаточных концентраций ионов меди и свинца в очищаемой среде в зависимости от марки материала табл. 1, 2.

Таблица 1.

Марка материала	Начальные концентрации меди на различных предприятиях, мг/л				
	0,44	1,4	6,6	25	75
КУ-2-8	8, 1 Е-05	2,3 Е-04	0,003008	0,013658	0,015402
КУ-23	9,52Е-05	2,7 Е-04	0,003518	0,0159746	0,018014
Тульсион Т-42	7,85Е-05	0,000224	0,002903	0,0131807	0,014863
Смола DOWEX HCR–S/S	7,94Е-05	0,000227	0,002937	0,0133362	0,015039
Сорбент АС	9,94Е-05	0,000284	0,003674	0,0166818	0,018811

Таблица 2.

Марка материала	Начальные концентрации свинца на различных предприятиях, мг/л				
	0,28	0,8	10,35	47	53
КУ-2-8	0,000025	0,000071	0,000923	0,004189	0,004724
КУ-23	0,000029	0,000083	0,001079	0,004900	0,005525
Амберлит IR-120	0,000026	0,000073	0,000945	0,004293	0,004841
Тульсион Т-42	0,000024	0,000069	0,000890	0,004043	0,004559
Смола DOWEX HCR–S/S	0,000024	0,000070	0,000901	0,004090	0,004613
Сорбент АС	0,000030	0,000087	0,001127	0,005117	0,005770

Концентрации для меди на различных предприятиях, мг/л указанные в табл. 1: 0,44 - общезаводские стоки медно-никелевого комбината; 1,4 - общие стоки машиностроительного предприятия; 2,76 - цех рафинирования меди и медно-никелевого комбината; 3,81 - гальванический цех ОЗФС; 5,12 - цех электролиза никеля медно-никелевого комбината; 6,6 - плавильный цех медно-никелевого комбината; 25 – золотоизвлекательное предприятие по полному иловому процессу; 75 - гальваническое производство.

Концентрации для свинца свинца на различных предприятиях, мг/л указанные в табл.2: 0,28 - гальванической производство; 0,8 - золотоизвлекательное предприятие по комбинированному процессу; 10,35 - гальванический цех; 47 - общий сток металлургического предприятия; 53 - золотоизвлекательное предприятие по полному иловому процессу.

В условиях очистки модельного раствора сточных вод, в области максимальных концентраций, большей избирательностью к ионам меди(II), обладают материалы: Смола DOWEX, Тульсион Т-42.

Если в растворе помимо удаляемого иона, находятся другие ионы со схожими по химической природе свойствами, имеет место процесс конкурентного связывания.

Полученные результаты пересчитывали в значение равновесной адсорбции на материалах для каждого из ионов металлов (ммоль/г): $Xi=f(C_{Cu(II)},C_{Pb(II)})$. Результаты представлены в виде трехмерного графика конкурентного связывания в координатах Ceq (мг-экв/л)-Xeq (мг-экв/г) (рис. 1).

Изотерма суммарной адсорбции, в большинстве случаев, принимает классическую форму Ленгмюра. Искажения характерны, в первую очередь, для изотермы обмена катиона с более низким сродством и происходят из-за его постепенного вытеснения, по мере увеличения концентрации свыше "точки насыщения", ионом с большим сродством к иониту.

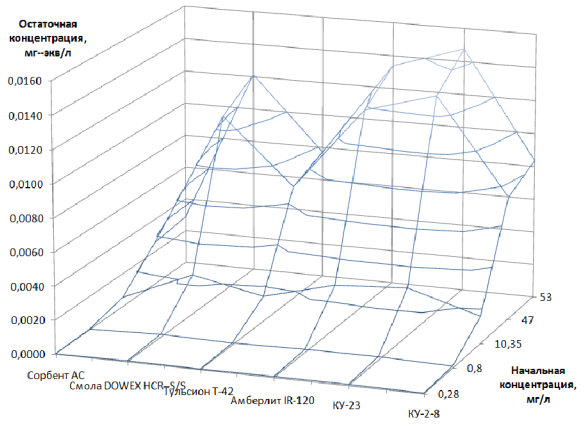

Рис. 1. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Cu(II)-Pb(II) для выбранных материалов.

Для материалов после достижения насыщения и приближения значения суммарной адсорбции к асимптоте ($X_{Cu+Pb,\infty}$) по мере увеличения начальных концентраций происходит вытеснение ионов Cu^{2+} ионами Pb^{2+}.

Определены параметры для ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} при построения трехмерных графиков, изотерма суммарной адсорбции, схожа с классической, в общем случае. Последние, по результатам дополнительных исследований системы этих материалов для Cu^{2+} - Pb^{2+}, имеют вид схожий с положительной частью гиперболического параболоида рис. 2-3 ($C_{(Cu(II)}$, катион с меньшим сродством).

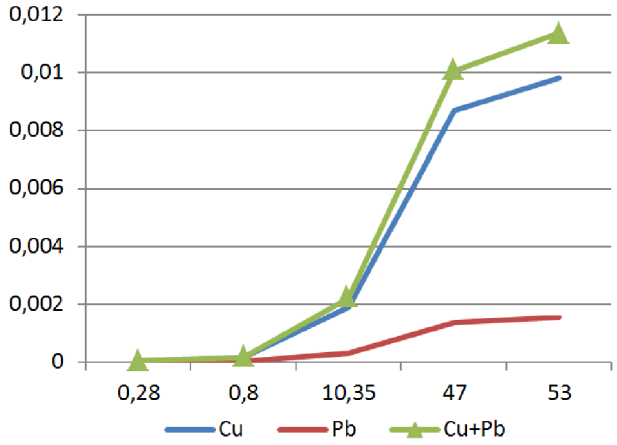

Рис. 2. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Cu(II)-Pb(II) для Тульсиона Т-42.

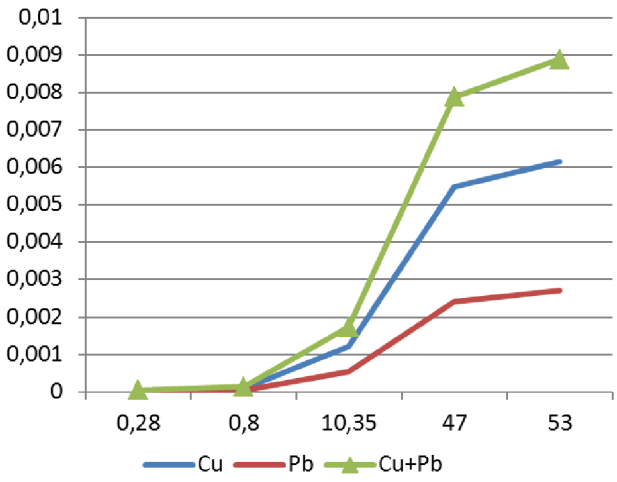

Рис. 3. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Cu(II)-Pb(II) для Смолы DOWEX HCR–S/S.

В данном случае, наибольшим сродством к ионам меди(II) должны обладать материалы, имеющие не только карбоксильные, но и аминные группы.

Для Тульсиона Т-42 были проведены аналогичные эксперименты для ионов Fe^{2+} и Pb^{2+}, которые представлены на рисунке 4.

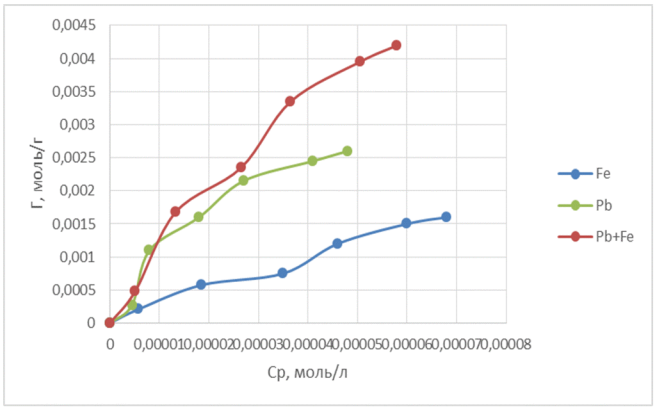

Рис. 4. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Fe (II)-Pb(II) для Тульсиона Т-42.

Для Смолы DOWEX HCR–S/S были проведены аналогичные эксперименты для ионов Fe^{2+} и Pb^{2+}, Co^{2+} которые представлены на рис. 5.

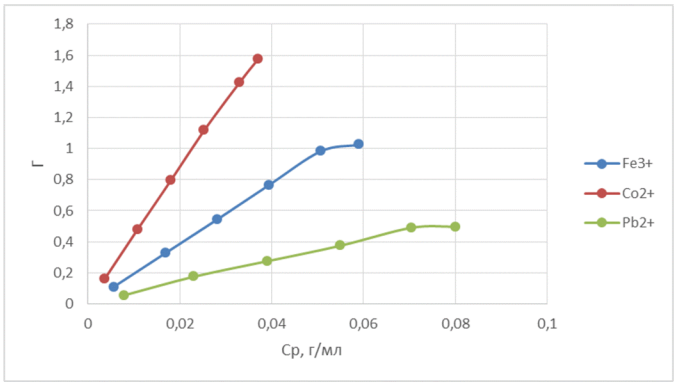

Рис. 5. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Co(II)-Pb(II)- Fe(II) для Смолы DOWEX HCR–S/S.

Несмотря на разнообразие применяемых адсорбентов, многие из них не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых к материалам подобного типа, в связи с чем поиск и разработка новых сорбционных материалов ведется постоянно [11].

Особо приоритетным является получение сравнительно дешевых сорбционных материалов на базе отходов промышленности, поскольку при этом отходы вторично используются [7-10]. Отходы производства в качестве адсорбентов лишены главного недостатка большинства применяемых адсорбентов, особенно ионообменных смол, – высокой стоимости.

Плохо очищенные сточные воды поступают в природные водоемы, где тяжелые металлы

накапливаются в воде и донных отложениях, становясь таким образом источником вторичного загрязнения. Соединения тяжелых металлов сравнительно быстро распространяются по объему водного объекта [12]. Частично они выпадают в осадок в виде карбонатов, сульфатов, частично адсорбируются на минеральных и органических осадках. Вследствие чего содержание тяжелых металлов в отложениях постоянно увеличивается, и когда адсорбционная способность осадков исчерпывается, тяжелые металлы поступают в воду, что и приводит к экологическому кризису [13-15].

Выводы

1) Для выбранных ионообменных материалов экспериментально получены изотермы конкурентного связывания, определены параметры сорбционных процессов в предельных случаях для низких и высоких концентраций ионов металлов (Co^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Pu^{2+}).
2) В области максимальных концентраций, в условиях, приближенных к условиям очистки сточных вод, большей избирательностью к ионам меди (II), обладают материалы: Смола DOWEX, Тульсион Т-42. Максимальной конкурентной емкостью обладают Смола Purolite A–860 и Тульсион Т-42 в области высоких концентраций, условно соответствующих концентрациям ионов свинца в сточных водах промышленных предприятий.
3) Используя математическое описание процесса фильтрации представленное в программе Delphi7 можно выбрать оптимальные сорбционные материалы, их возможные комбинации для реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

Список литературы

1. Скороходов В.Ф., Месяц С.П., Остапенко С.П. Решение проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий от многокомпонентных загрязнений // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Lin L-C., Juang R-S. Ion-exchange kinetics of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions with two chelating resins // Chem. Eng. J. 2007. V.132 P. 205-210.
3. Heavy metals in waste. Final Report // European Commission DG ENV E3. – Denmark, 2002. – February. – 86 p.
4. Рогова О.Б., Водяницкий Ю.Н. Сорбция цинка и меди в почвах зоны воздействия Череповецкого металлургического комплекса // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева РАСХН. – 2010. – № 6. – С. 64–74.
5. Сукрушев А.В., Браславский Ю.В. Водный режим контуров АЭС: учеб. пособие. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – 220 с.
6. Черкашина Н.И. Очистка сточных вод от ионов металлов сорбентами из природных материалов на основе лигнина / Н.И. Черкашина, А.С. Черкашин, И.И. Марончук // Новый университет. Серия: Технические науки. 2015. № 11-12 (45-46). С. 51-57.
7. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ , 2016. – 356 с.
8. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
9. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Культенко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность.- 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
10. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун–т ядерной энергии и промышленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
11. Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Березин С.Е., Баженов В.И., Черненко А.В. Обоснование выбора технологиче- ского оборудования по очистке сточных вод // Наилучшие доступные технологии водо- снабжения и водоотведения. – 2014. - № 2 (апрель) – С. 48-58.
13. Пономарёв В.Г. Выбор сооружений для очистки сточных вод от взвешенных загрязнений // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. - № 1(февраль) – С. 45-52.
14. Данилович Д.А. Практика сравнения эффективности аэрационных систем // Наилучшие до-

ступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. - № 4 (август) – С. 59-64.
15. Ярошевский А.Б., Гонголева А.А. Очистка медьсодержащих сточных вод гальванических производств щелочными сточными водами Актуальные проблемы социально-экономической и экологической безопасности Поволжского региона сборник материалов VIII международной научно-практической конференции. 2016. С. 85-88.

References

1. Skorokhodov V. F., Mesyats S. P., Ostapenko S. P. solution to the problem of wastewater treatment of industrial enterprises from multi-component of pollution // Mining journal.. – 2010. – № 9. – C. 106–108.
2. Lin L-C., Juang R-S. Ion-exchange kinetics of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions with two chelating resins // Chem. Eng. J. 2007. V.132 P. 205-210.
3. Heavy metals in waste. Final Report // European Commission DG ENV E3. – Denmark, 2002. – February. – 86 p.
4. Rogova O. B., Vodyanitskii, Yu. N. Sorption of zinc and copper in soils of the impact zone of Cherepovets metallurgical complex // Bulletin of Soil-governmental Institute. V. V. Dokuchaev. – 2010. – № 6. – C. 64–74.
5. Sucrose A. V., Braslavsky J. V. Water circuits of nuclear power plants: proc. allowance. – Sevastopol: SNUEI, 2013. – 220 c.
6. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistka stochnix vod ot ionov metallov sorbentami iz prirodni[materialov na osnove lignina [Wastewater treatment from metal ions by sorbents from natural materials based on lignin] New University. Series: Technical Sciences. 2015. No. 11-12 (45-46). S. 51-57.
7. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanie effectivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [The study of effective sorption materials for extraction of radionuclides of technological environments Materials of scientific-practical conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety" (15 – 18 June 2016, Sevastopol). – Sevastopol: SevGU, 2016. – 356 p.
8. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov[The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SNUNE and industry 2011. – P. 22.
9. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A, Kultenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke stochnix vod I tehnologicheskix sred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] Environmental safety, 2013, the Issue Vol. 2(16) – Pp. 89-92.
10. Cherkashina N.I., Erofeev V. A., Pat. 93824 Ukraine, IPC 51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Metod proizvodstva modificirovannogo kostochkovogo sorbenta “Foliox- MSP” [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent "Foliox- MSP"]; the applicant and patent-winner of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2010 04280; - 13.04.2010 ; publ. 12.07.10. – P 5.
11. 11.Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Berezin S. E., Bazhenov V. I., Chernenko V. A. the Rationale for the selection of technological equipment for sewage treatment / Best available technologies of water supply and sanitation. – 2014. - № 2 (April) – P. 48-58.
13. 13.Ponomarev, V. G. the Choice of structures for sewage treatment from suspended contaminants // the Best available technology of water and wastewater. – 2015. - № 1(February) – P. 45-52.
14. 14. Danilovich D. A., the Practice of comparing the efficiency of the aeration systems // Best available technology of water and wastewater. – 2015. - №. 4 (August) – P. 59-64.
15. Yaroshevskii, A. B., Gogoleva A. A. Purification of copper-containing wastewater electroplating alkaline wastewater Actual problems of socio-economic and ecological safety of the Volga region the collection of materials of VIII international scientific-practical conference. 2016. P. 85-88.

УДК 543.544-414

Выделение урана из технологических сред сорбентом на основе лигнина

Н.И. Черкашина[1], В.А. Ерофеев[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]Selyanskij-AS@yandex.ru

Статья поступила 06.11.2018 г.; после доработки 16.11.2018 г.

Аннотация

Определены сорбционные характеристики: коэффициент очистки, коэффициент распределения, степень извлечения ионов урана из раствора. Проведен сравнительный анализ результатов физико-химических исследований между модификациями лигнина. Рассчитана статическая обменная емкость (СОЕ) для каждой модификации сорбционного материала «Фолиокс» по определенному катиону и аниону.

Ключевые слова: фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, насыпная масса сорбента, модифицированный лигнин.

The recovery of uranium from process media by a sorbent on the basis of lignin

N.I. Cherkashina[1], V.A. Erofeev[2]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia.
[1]selyanskij-as@ya.ru

Received 06.11.2018 y.; received in final form 16.11.2018 y.

Abstract

Determined sorption characteristics: cleaning rate, the distribution coefficient, degree of extraction of uranium ions from solution. A comparative analysis of the results of physical and chemical research between the modifications of lignin. Calculated the static exchange capacity (SEC) for each modification of the sorption material "Polyox" for a particular cation and anion.

Keywords: filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, bulk weight of the sorbent, modified lignin.

Введение

Жидкие радиоактивные отходы АЭС среднего и низкого уровня активности представлены в основном радионуклидами продуктов деления урана – ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{90}Sr, ^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra, и ^{60}Co. С учетом темпов развития ядерной энергетики можно предположить, что за текущее десятилетие объемы радиоактивных отходов, накопленных в результате работы АЭС, составят свыше 10^{19} Бк [1]. Очевидно, что хранение жидких отходов в баках ненадежно и дорого. В то же время различные предполагаемые программы обезвреживания, долгосрочного хранения и удаления РАО находятся пока в стадии исследований и разработок.

Сорбционные технологии, традиционно используемые для извлечения радионуклидов из водных растворов, являются достаточно эффективными. Концентрирование с помощью дешевых органических сорбентов на основе лигнина характеризуется эффективностью извлечения микроэлементов из растворов, простотой в выполнении и удобством для последующего опре-

деления исследуемых элементов различными методами анализа [2, 3]. Это позволяет использовать доступное оборудование, снизить общую стоимость. Разработка новых эффективных и дешевых сорбционных материалов до сих пор актуальна. Сорбционные материалы на основе лигнина производятся из отходов сельскохозяйственных производств. Сорбент получен в производственных условиях на предприятии НПК «Фолиокс» по патенту №93824 от 10.03.2011 «Способ получения косточкового порошкового модифицированного сорбента» Фолилкс-КМП по описанной методике. Отобраны 3 модификации по 1 кг, которые использовали в экспериментальных исследованиях.

Методика выделения (извлечения) урана

При разработке методики и проведении лабораторных опытов использовались следующие исходные данные и материалы: исходный анализируемый раствор, содержащий U (VI) с исходной активностью $5{,}75 \cdot 10^{-7}$ Ku (скорость счета для 2 мл раствора 2730 имп/мин); состояние сорбента лигнина: порошкообразное; объем исходного анализируемого раствора 500 мл; масса сорбента, использованного для очистки (без прокаливания) 10,3 г; pH исходного анализируемого раствора 5; установки измерения скорости счета, мощности дозы (УМФ-2002, МКГ-1, МКС-05 ТЕРРА).

Приготавливается навеска сорбента, которая помещается в фарфоровое блюдце. Выбранная навеска помещается в сушильный шкаф и прокаливается там 1,5-2 часа при температуре 100 ^{0}C до постоянного веса.

Рассчитывается содержание влаги в прокаленном сорбенте, по формуле:

$$X = \frac{m \cdot 100}{m_c},\% \quad , \qquad (1)$$

где m - масса влаги, рассчитываемая по разнице масс сорбента до прокаливания и после, г; m_c - масса сорбента до прокаливания, г.

$$X = \frac{0{,}756 \cdot 100}{10{,}3} = 7{,}3\%$$

В то время, когда сорбент находится в сушильном шкафу, готовится исходный раствор содержащий ^{238}U. Измеряется pH.

Производится расчет скорости счета приготовленного раствора, $N_{исх}$. Для чего используется три подложки, на каждую из которых с помощью пипетки помещается 2 мл исходного анализируемого раствора, после чего они помещаются под сушильную лампу для удаления влаги. Количество импульсов от исходного раствора составило 6825 имп/мин. В каждом из расчетов учитывается $N_ф$. Известное количество сорбента помещается для набухания в стакан и заливается дистиллированной водой. Набухший сорбент при помощи специальной стеклянной трубки помещается в хроматографическую колонку, и через него пропускается анализируемый раствор со скоростью 2 мл/мин.

Во время вышеуказанной процедуры, после пропускания через хроматографическую колонку каждых 50 мл анализируемого раствора, производится отбор пробы в количестве 2 мл и измеряется скорость счета фильтрата, согласно выше приведенной последовательности, с той лишь разницей, что вместо трех подложек используется только одна. По результатам измерений скорость счета фильтрата после пропускания раствора составила 2075 имп/мин.

Находится скорость счета поглощенных твердой фазой (сорбентом), по формуле:

$$N_{тв.ф.} = N_{исх.} - N_{ф.}, \qquad (2)$$

$N_{тв.ф} = 6825 - 2075 = 4750$ имп/мин

Производится расчет коэффициента распределения по формуле:

$$K_p = \frac{A_{тв.ф.} \cdot V_{исх.р-ра}}{A_{ф-та} \cdot m_c^э} = \frac{N_{тв.ф.} \cdot V_{исх.р-ра}}{N_{ф-та} \cdot m_c^э}, \qquad (3)$$

где $N_{тв.ф.}$- скорость счета твердой фазы, имп/мин; $N_{ф-та}$ – скорость счета всего фильтрата, имп/мин; $V_{исх.р-ра}$ – объем пропущенного анализируемого раствора, мл; $m^э_c$ - масса использованного для очистки сорбента (после прокаливания), г.

$$K_p = \frac{4750 \cdot 500}{2075 \cdot 10{,}3} = 111$$

Рассчитывается коэффициент очистки по формуле:

$$K_o = \frac{A_{исх.}}{A_{ф-та}}, \qquad (4)$$

$$K_o = \frac{6825}{2075} = 3{,}3$$

Для того чтобы перевести скорость счета в активность с помощью образцового источника на той же самой установке, на которой проводили измерения, необходимо рассчитать коэффициент пересчета, по формуле:

$$K_п = \frac{A_{обр.}}{N_{обр.}}, \qquad (5)$$

где $A_{обр.}$- активность образцового источника, рад/с; $N_{обр}$- скорость счета образцового источника, имп/мин.

$$K_n = \frac{13{,}1}{4{,}2} = 3{,}12$$

Благодаря рассчитанному выше коэффициенту находится активность исходного анализируемого раствора по формуле:

$$A_{исх} = N_{исх} \cdot K_n, \qquad (6)$$

Подставив, получено: $A_{исх.} = 409500 \cdot 3{,}12 = 127{,}8 \cdot 10^4$ расп/мин=21294 расп/с=$5{,}75 \cdot 10^{-7}$ Ku.

Зная, что в исходном растворе вся активность практически приходилась на ^{238}U, а его масса в 1г дает $A = 3{,}33 \cdot 10^{-7}$ Ku, находится масса содержащегося в растворе ^{238}U.

$$M_U = \frac{3{,}33 \cdot 10^{-7}}{5{,}75 \cdot 10^{-7}} = 0{,}587 \text{ г.}$$

Эксперимент

При проведении исследований использовались следующие материалы:

- сорбент на основе виноградной косточки лигнина (модифицированный);
- сорбент на основе лигнина – гидролизного (модифицированный).

В трех стаканах приготавливается 3 исходных раствора содержащих уранилнитрат в концентрациях 2г/л в количестве 200 мл каждый. Измеряется скорость каждого приготовленного раствора. Измеряется pH ($N_{исх.}$).

Приготавливается 3 навески сорбента на основе лигнина природного и помещается в 3 разных стакана. Предварительно сорбент помещается в сушильный шкаф на 1,5 часа при температуре 100^0C (m_c).

В каждый стакан добавляется по 100 мл приготовленного раствора, содержащего уран.

Первый стакан оставляют на 1,25 часа, второй на 1,5 часа, а третий на 1,75 часа.

После истечения каждого указанного времени растворы отфильтровывают, используя для этой цели бумажный фильтр (с красной лентой). Производится измерение скорости счета каждого полученного фильтрата ($N_{ф.}$).

Рассчитывали коэффициенты очистки и распределения для каждого раствора. Полученные результаты сводятся в таблицу.

Снова проводятся все вышеуказанные процедуры, лишь с той разницей, что вместо сорбента лигнина природного используется сорбент на основе лигнина – гидролизного. В каждом из расчетов учитывается скорость счета фона ($n_ф$). Результаты опытов сведены в таблицу 3, время 1-4 измерений 1,25 часа, 2-5 измерений 1,5 часа, 3-6 измерений 1,75 часа.

Таблица 1. *Результаты опытов в статических условиях.*

модификация	№ стакана	Nф, имп/с	Nисх. имп/с	V, мл	pH	m_c, г	Ксч= Nисх./Nф	Кр= (Nисх.- Nф-та/ Nф-та)· V/ mc
Лигнин природный	1	0,72	2,01	100	6	4,998	9,13	163
	2		2,01	100	6	5,000	11,2	203
	3		2,01	100	6	4,998	12,6	231
Лигнин - гидролизный	4		2,01	100	6	5,000	13,4	248
	5		2,01	100	6	5,006	16,8	314
	6		2,01	100	6	5,001	19	360

В результате проведенных исследований эффективности выделения урана из технологической среды видно, что с увеличением количества пропущенного раствора через сорбент на основе лигнина – гидролизного увеличивается вероятность того, что по мере «насыщения» сорбента будет происходить проскок ионов урана, что и обуславливает повышение скорости счета полученного фильтрата. Видно, что с увеличением времени контакта сорбента и раствора, K_p продолжает увеличиваться, но происходит это не столь стремительно, как в начальный момент времени, а более постепенно. Это обусловлено тем, что происходит «насыщение» сорбента и увеличивается вероятность проскока ионов сорбируемого вещества (в данном случае урана 238).

Экспериментально было определено, что химическая модификация лигнинов приводит к изменению структурного и функционального состава макромолекулы.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2. *Результаты анализа*

.№ п/п	Вид препарата	А, г	$C_н$, $Ba(OH)_2$	$C_н$, HCl	а, мл	W, %	З, %	∑, мг-экв/л
1.	Лигнин не-модифицированный	2 2	0,01 0,008	0,1 0,1	0,86 0,3	8,2 8,2	4,1 4,1	1,56 0,39
2.	Лигнин (модификация № 1)	2 2 2	0,01 0,01 0,01	0,1 0,1 0,1	0,7 0,56 0,8	11,7 11,7 11,7	5,85 5,85 5,85	1,66 1,66 1,66
3.	Лигнин (модификация № 2)	2 2 2 2	0,01 0,01 0,008 0,008	0,1 0,1 0,1 0,1	1,0 0,9 1,1 1,1	25,7 25,7 25,7 25,7	12,85 12,85 12,85 12,85	2,1 2,2 2,19 2,19

Модификация № 1 – лигнин, обработанный HNO_3, модификация № 2 – лигнин, обработанный HCl и высушенный.

Таблица 3. *Результаты функционального анализа.*

Функциональные группы	Целевой продукт	Прототип патент [3]	Сорбент «Фолиокс» ТУУ24.6-305-78756-001-2002
	мг-экв/г		
Группы ($–COOH$; OH – фенольные)	15,05	14,56	5,78
Карбонилы $= CO$	1,58	1,45	1,15
Спиртовые гидроксилы $–OH$	4,05	3,88	5,55
Связанный азот	3,99	3,75	2,87

Примечание: связанный азот зафиксирован в азотосодержащих функциональных группах: аммониевых $–COONH_4$; аминных $–COONH_2$ и т.д.

Химическая модификация лигнина приводит к изменению функционального и структурного состава и образованию новых соединений, обладающих повышенной химической активностью. Инструментальные методы исследований показали образование новых соединений лигнина, результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. *Результаты физико-химических исследований*

Образцы	Физико-химические величины		
	насыпная масса ГОСТ 10898.2-7 (г/см^3)	удельный объем ГОСТ 10898.5-84 (см^3/г)	удельная поверхность ГОСТ 19898.5-84 (м^2/г)
Целевой продукт	0,573	1,742	759
Прототип патент [3]	0,758	1,319	325
Сорбент «Фолиокс» ТУУ24.6-30578756-001.2002	0,606	1,648	310

В результате механохимической модификации возрастает активность соединений лигнина за счет увеличения кислых функциональных групп с 6,2 до 15, 2 мг-экв/г и роста свободных образований с $1{,}1 \cdot 10^{18}$ спин/г до $4{,}45\text{-}5{,}4 \cdot 10^{18}$ спин/г, участвующих в реакциях окислительно-восстановительного взаимодействия.

После установления равновесия рассчитывали статическую обменную емкость (СОЕ) каждого образца по определенному катиону и аниону. Результаты опытов сведены в табл. 5, 6, 7.

Таблица 5. *Результаты СОЕ для радионуклидов*

Образцы	СОЕ (мг-экв/г)									
	ГОСТ 20255.1-89	Cs^{+}	Sr^{2+}	Hg^{2+}	Pb^{2+}	Cd^{2+}	Cu^{2+}	Cr^{3+}	Fe^{3+}	UO_2^{2+}
Целевой продукт Фолиокс-«КПМ»	6,91 7,02 6,95	5,01 4,98 4,91	6,02 6 5,99	4,44 4,48 4,46	7,01 7,03 7,0	3,99 3,89 3,93	7,02 7,05 7,04	6,88 6,92 6,96	7,91 7,96 7,94	6,13 6,11 6,09
Прототип пат. №22904А от 05.05.98	6,19 6,14 6,15	4,39 4,36 4,36	5,78 5,82 5,77	4,12 4,18 4,17	6,91 6,97 6,94	3,58 3,63 3,61	6,81 6,89 6,88	6,61 6,67 6,63	7,11 7,16 7,15	5,97 5,9 5,93
Сорбент «Фолиокс» ТУУ246-30578756-001.2002	4,25 4,28 4,27	4,81 4,79 4,80	5,41 5,43 5,43	3,99 3,78 3,69	5,01 5,18 5,12	3,22 3,2 3,21	6,03 5,99 6,00	5,12 5,18 5,13	6,44 6,4 6,44	4,43 4,41 4,39

Таблица 6. Сравнительные результаты СОЕ

Образцы	СОЕ (мг-экв/г)				
	ГОСТ 20255.1-89	$Cr_2O_7^{2+}$	SO_4^{2-}	$C_2O_4^{2-}$	IO_3^{-}
Целевой продукт Фолиокс «КПМ»	4,03 4,04 4	4,89 4,91 4,91	4,76 4,78 4,78	4,49 4,49 4,51	4,01 4 3,99
Прототип патент [3]	3,97 3,94 3,94	4,76 4,71 4,78	4,55 4,48 4,51	4,03 4,01 4,06	3,71 3,76 3,74
Сорбент «Фолиокс» ТУУ246 – 3057875 6 – 001.2002	2,47 2,47 2,44	1,88 1,89 1,88	1,48 1,52 1,51	1,76 1,79 1,77	1,99 1,91 1,94

Результаты адсорбционной способности материала приведены в табл. 7.

Таблица *7. Величина предельной адсорбции*

Образцы	Масса образца m, г	Величина предельной адсорбции, а мг/г
Целевой продукт «Фолиокс-КПМ»	1,00006 1,0001 0,9999	184,4 182,7 180,9
Прототип патент [3]	1,0004 1,0002 1,0005	173,6 171,9 174,3
Сорбент «Фолиокс» ТУУ246-30578756-001.2002	1,0003 1,0001 1,0001	166,4 168,1 166,8

Как видно из таблиц 5, 6, 7, сорбент «Фолиокс-КПМ» (целевой продукт) обладает повышенными ионообменными и адсорбционными свойствами по отношению к различным катионам, анионам, органическим компонентам в водных и неводных средах по сравнению с известными ионообменными материалами, полученными из растительного сырья (отходы).

Таким образом, расширение диапазона физико-химических характеристик материала происходит не только из-за увеличения контактной поверхности, но и за счет включения новых функциональных групп.

Выводы

Для выбранных ионообменных материалов проведен сравнительный анализ сорбционных характеристик в статических условиях: определены коэффициент очистки, коэффициент распределения, степень извлечения ионов урана из раствор, рассчитана статическая обменная емкость (СОЕ) для каждой модификации сорбционного материала «Фолиокс» по определенному катиону и аниону.

Список литературы

1. Болятко В.В., Ксенофонтов А.И., Харитонов В.В. Экология ядерной и возобновляемой энергетики: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 264 с.
2. Черкашина Н.И. Анализ характеристик сорбционной способности сорбента «ФОЛИОКС-КГО» / И.А. Черкашина, В.А. Ерофеев // Матер. XII Междунар. конф. «Экология и развитие общества». – СПб: Сосновый Бор, 2009. – С. 64 - 66.

3. Пат. 93824 Украины, МПК[51] B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Спосіб одержання кісточкового порошкового модифікованого органічного сорбенту «Фоліокс КПМ» / В.А. Эрофээв, Н.І. Черкашина.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун–т ядерної енергії та промисловості. – № a 2010 04280; заявл. 13.04.2010 ; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13 (I ч.).
4. Черкашина Н.И. Очистка сточных вод от ионов металлов сорбентами из природных материалов на основе лигнина / Н.И. Черкашина, А.С. Черкашин, И.И. Марончук // Новый университет. Серия: Технические науки. 2015. № 11-12 (45-46). С. 51-57.
5. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ , 2016. – 356 с.
6. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
7. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Культенко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность.- 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
8. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофееф.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун–т ядерной энергии и промыщленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.

References

1. Bolyatko, V. V., Ksenofontov, A. I., Kharitonov V. V. Ecology, nuclear and renewable energy: a Training manual. M.: NRN University MIPU, 2010. – 264 p.
2. Cherkashina N. and. Analysis of the characteristics of the sorption capacity of the sorbent "FOLIOX-SGN / I. N. Cherkashin, V. A. Erofeev // Mater. XII international Conf. "Ecology and development of society". - St. Petersburg: Sosnovy Bor, 2009. – P. 64 - 66.
3. Pat. 93824 Ukraine, IPC51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. The method of darianna stoccopowder modificando organge sorbent "FOLIOX-SGN" / V. A. Erofeev, N. I. Cherkashina.; the applicant and the patent holder of the Sevastopol national. Univ energy and industry. - №a 2010 04280; declared. 13.04.2010 ; publ. 12.07.10, Byul. № 13 (I p.).
4. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistka stochnix vod ot ionov metallov sorbentami iz prirodni[materialov na osnove lignina [Wastewater treatment from metal ions by sorbents from natural materials based on lignin] New University. Series: Technical Sciences. 2015. No. 11-12 (45-46). S. 51-57.
5. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanie effectivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [The study of effective sorption materials for extraction of radionuclides of technological environments Materials of scientific-practical conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety" (15 – 18 June 2016, Sevastopol). –Sevastopol: SevGU, 2016. – 356 p.
6. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov[The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SNUNE and industry 2011. – P. 22.
7. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A, Kultenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke stochnix vod I tehnologicheskix sred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] Environmental safety, 2013, the Issue Vol. 2(16) – Pp. 89-92.
8. Cherkashina N.I., Erofeev V. A., Pat. 93824 Ukraine, IPC 51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Metod proizvodstva modificirovannogo kostochkovogo sorbenta “Foliox- MSP” [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent "Foliox- MSP"]; the applicant and patent-winner of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2010 04280; - 13.04.2010 ; publ. 12.07.10. – P 5.

ISSN 2413-5526

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 4 № 4

SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 4 No 4

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 nauchnyyzhurnal@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 28.12.2018. Изд. № 1/19. Зак. 4/19. Тираж 65 экз.
Объем 16 п.л. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 15,68. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»