

УДК 621.438

МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ СБРОСНОГО ТЕПЛА

Чередниченко А. К., к.т.н, доц., доцент кафедры судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения имени адмирала С. О. Макарова (г. Николаев), E-mail: cherednichenko.aleksandr65@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8746-9132

В данной статье обсуждаются методологические аспекты экспериментальных исследований при оценке эффективности применения термохимической регенерации сбросного тепла в энергетических комплексах. Основной целью данной работы является разработка методологии комплексного экспериментального исследования параметров и показателей энергетических установок при проверке адекватности разработанных математических моделей. В статье обобщены задачи и сформулированы этапы комплексного экспериментального исследования параметров энергетической установки. Предложено применить принцип многоуровневой декомпозиции в сочетании с инкапсуляцией при экспериментальном исследовании. Приведен пример реализации данного принципа при экспериментальном исследовании характеристик комбинированной дизель-газотурбинной установки с термохимической регенерацией сбросного тепла. Даны характеристики экспериментальных стендов и компьютеризованной системы измерений параметров.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, критерий, газотурбинный двигатель, термохимическая регенерация тепла, декомпозиция, инкапсуляция.

Постановка проблемы. Ужесточение требований Международных конвенций по ограничению загрязнения окружающей среды и необходимость рационального потребления углеводородных энергоресурсов требуют создания принципиально новых энергетических установок для офшорных объектов добычи, накопления и переработки ископаемых углеводородов, а также энергетических установок морских судов.

В работе [1] на основе анализа развития судовой энергетики сформулированы основные критерии комплектации судовой энергетической установки. Применяв данный подход к анализу и выявлению рационального состава энергетической установки, объединив ряд критериев [2], можно сгруппировать их по принципам максимизации и минимизации показателей (рис. 1).

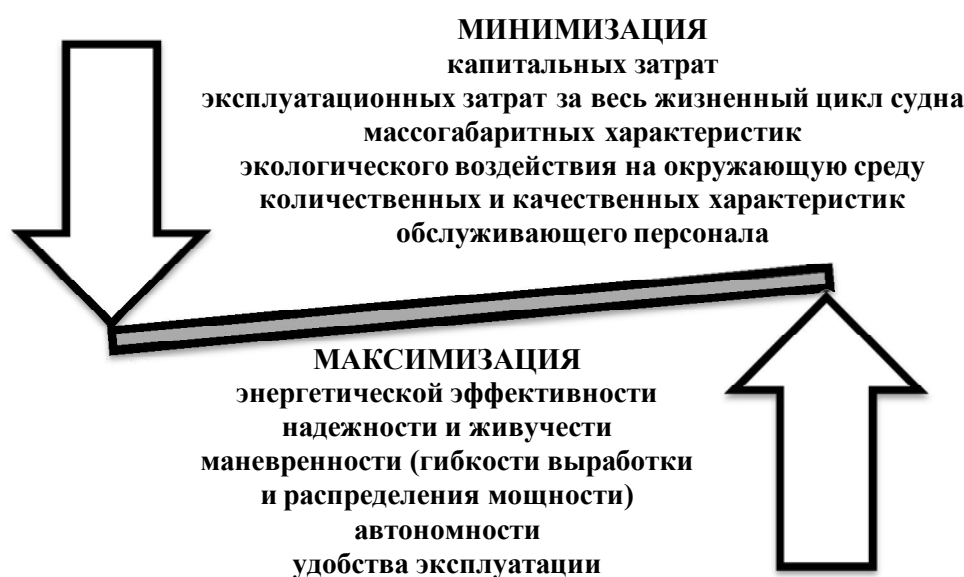


Рисунок 1 – Основные критерии выбора состава судовой энергетической установки

Разнообразие требований, часть из которых может противоречить друг другу, приводит к необходимости определить значимость критериев и выделить группы «определяющих» критериев в зависимости от целевой функции судна. Для оценки эффективности пропульсивного комплекса судна с учетом экологического воздействия энергетической установки на окружающую среду ИМО, в соответствующих резолюциях, указывает на необходимость при проектировании использовать конструктивный индекс энергетической эффективности судна *EEDI (Energy Efficiency Design Index)* [3]. В работе [4] автором предложена иерархия групп критериев, согласно которой для газовоза, предназначенного для перевозки сжиженного природного газа (LNG - Liquefied Natural Gas), приоритетность отдается критериям обеспечения эксплуатационной работоспособности в условиях воздействия внешних и внутренних источников.

Анализ исследований и публикаций. В результате анализа характеристик альтернативных энергетических установок объектов океанотехники и морских судов выявлено, что перспективным вариантом являются энергокомплексы на базе комбинированных установок с термохимической регенерацией [5]. Эффективность таких установок исследована в Центре Перспективных Энергетических Технологий научно-исследовательского института «Энергетики и машиностроения» Национального университета кораблестроения имени адм. Макарова (ЦПЭТ НИИЭМ НУК) методами математического моделирования. Многовариантность схемных решений потребовала выявления взаимосвязей элементов энергокомплекса методами системного анализа. В процессе исследования рассмотрено четыре иерархических уровня: комплекс в целом, подсистемы комплекса, группа оборудования подсистем, оборудование входящие в группы.

Цель работы. Проведенные теоретические исследования показывают эффективность и перспективность термохимической регенерации тепла (ТХР) как в тепловых двигателях, так и в энергокомплексах объектов океанотехники и морского транспорта. Проверка адекватности разработанных математических моделей потребовала разработки методологии комплексного экспериментального исследования параметров и показателей эффективности энергетических установок с термохимической регенерацией сбросного тепла.

Изложение основного материала. В ЦПЭТ НИИЭМ НУК под руководством проф. М. Р. Ткача и проф. Б. Г. Тимошевского создана экспериментальная база для проведения исследований элементов энергетических установок на базе альтернативных топливно-энергетических ресурсов [6]. В течении ряда лет проводится большой объем экспериментов, направленных на изучение характеристик работы тепловых двигателей на альтернативных топливах [7, 8, 9].

Накоплен большой опыт проведения экспериментальных исследований, который позволил обобщить задачи и сформулировать этапы комплексного экспериментального исследования параметров и показателей эффективности энергетических установок с термохимической регенерацией сбросного тепла.

Применение основных положений системного подхода при формулировке этапов комплексного экспериментального исследования позволило выявить основные обязательные компоненты. К ним отнесены: планирование эксперимента; учет влияния параметров и случайных воздействий окружающей среды; оценка результатов с учетом ошибок и выявление их совокупного влияния; верификация результатов, оценка их приемлемости; обработка полученных данных, систематизация и представление их в упорядоченном виде.

Основные задачи экспериментальных исследований сведены к следующему:

- разработка и создание экспериментальных стендов для исследования показателей и параметров элементов энергоустановок с ТХР;
- разработка и создание экспериментальных стендов для исследования показателей и параметров тепловых двигателей, работающих на продуктах термохимической конверсии углеводородных топлив;

- создание системы измерения и регистрации параметров экспериментальных стендов и программного обеспечения по их обработке и анализу;
- демонстрация принципиальных технологических и конструктивных решений;
- определение рациональных диапазонов режимных параметров циклов;
- разработка технологических решений и выбор рациональных схем аппаратного оформления элементов энергокомплексов с ТХР;
- исследование показателей рабочего процесса, энергетических характеристик и показателей работоспособности тепловых двигателей при использовании продуктов конверсии углеводородных топлив;
- создание системы измерения и регистрации параметров экспериментальных стендов и программного обеспечения по их обработке и анализу;
- выявление взаимосвязи параметров элементов энергокомплекса с ТХР.

С учетом основных задач экспериментальных исследований могут быть сформулированы следующие укрупненные этапы:

- разработка программ испытаний с учетом особенностей различных этапов экспериментальных исследований;
- выбор методов и средств измерения, позволяющих обеспечить:
- необходимую точность отслеживания и регистрации параметров;
- воспроизводимость результатов исследований;
- тарировка средств измерения, с учетом их работы в составе системы измерения и регистрации параметров;
- проведение экспериментальных исследований;
- анализ экспериментальных данных и обработка полученных результатов;
- проверка сходимости результатов математического моделирования и экспериментальных исследований.

Характер измерений, необходимых при проведении экспериментальных исследований предусматривает ряд особенностей, что оказывает существенное влияние на выбор элементной базы системы измерения и регистрации параметров. К таким факторам могут быть отнесены: необходимость контроля и фиксации величин различной физической природы, необходимость измерения квазистационарных и нестационарных величин, необходимость измерения характеристик как на стационарных, так и нестационарных режимах работы оборудования, выявление случайной составляющей результатов многократным дублирование измерений. Разработанная в ЦПЭТ НИИЭМ НУК компьютеризованная система измерений параметров предусматривает измерение следующих физических характеристик, с использованием следующих датчиков и преобразователей сигналов:

- температура – термоэлектрическими преобразователями;
- давление – тензорезистивными преобразователями;
- вес – датчиками силы;
- масса - электронными цифровыми весами;
- силы постоянного и переменного тока – датчиками тока на основе эффекта Холла;
- напряжения постоянного и переменного тока – измерительными преобразователями;
- объемный расход жидкости – преобразователями расхода турбинного типа;
- объемный расход газообразной среды – по перепаду давления на расходомерном устройстве, а также мембранным расходомером;
- состав синтез-газа – хроматографом NeoCHROM Class B.

Параллельный контроль параметров осуществлен штатными и дополнительными индивидуальными механическими приборами:

- частота вращения коленчатого вала двигателя – по тахометру и образцовому цифровому частотомеру;
- величины давления охлаждающей воды, циркуляционного масла, топлива и воздуха – штатными манометрами и дополнительными образцовыми манометрами;
- напряжение генератора и сила тока в цепи – цифровыми вольтметрами и амперметрами.

При современных объектно-ориентированных подходах к проектированию сложных технических систем [10, 11] предполагается две стратегии рассмотрения предмета проектирования: декомпозиция и инкапсуляция (рис. 2).

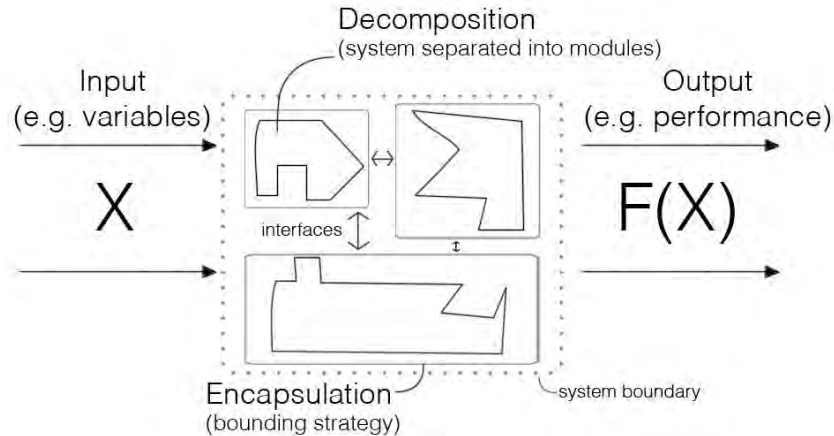


Рисунок 2 – Декомпозиция и инкапсуляция как стратегии проектирования сложных технических систем [10]

Используя известный из теории сложных технических систем принцип многоуровневой декомпозиции, решение сложной технической задачи можно заменить решением серии меньших задач. Адаптировав данный принцип к экспериментальному исследованию можно применить одну из существующих стратегий декомпозиции. Наиболее близкой является функциональная декомпозиция, которая предусматривает, что основой разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов. Одновременно для функциональной подсистемы может быть применен принцип декапсуляции, предусматривающий рассмотрение подсистемы, на уровне системы как «черного ящика», обменивающегося с системой входными и выходными физическими и информационными потоками.

В качестве примера реализации данного метода рассмотрим задачу экспериментального исследования комбинированной дизель-газотурбинной энергетической установки газозова LNG с термохимической регенерацией тепла отходящих газов газотурбинного двигателя (ДГТУ с ТХР).

В разработанной математической модели энергокомплекс представлен в виде совокупности подсистем [5]:

- энергетической подсистемы, в которой химическая энергия топлива преобразуется в механическую, электрическую и тепловую энергию;
- подсистемы утилизации тепла, предназначенная для преобразования сбросной теплоты энергетической подсистемы в механическую, электрическую и тепловую виды энергии;
- технологической подсистемы конверсии топлива.

При совмещении принципов стратегии функциональной декомпозиции с инкапсуляцией подсистем, установка может быть представлена в виде системы из трех функционально взаимосвязанных экспериментальных стендов (рис. 3). Инкапсуляция предусматривает, что связь между элементами подсистем осуществляется потоками энергоносителей (теплоносителей и рабочих тел циклов), посредством которых осуществляются процессы энергетического взаимодействия между подсистемами

и в целом, в энергокомплексе [12].

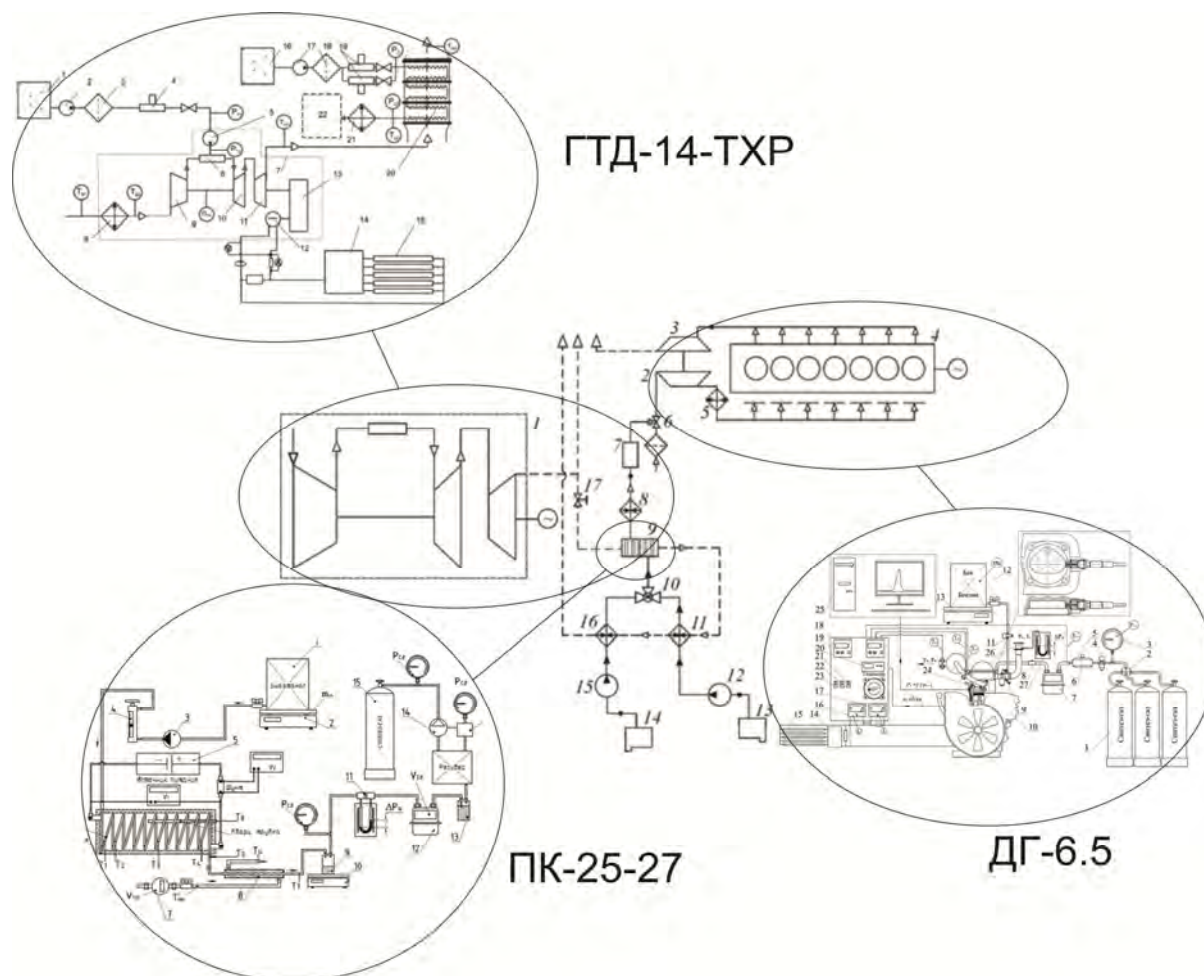


Рисунок 3 – Пример совмещения принципов стратегии функциональной декомпозиции с инкапсуляцией подсистем при экспериментальном исследовании характеристик ДГТУ с ТХР

Стенд паровой конверсии ПК 25-27, предназначен для определения влияния основных параметров процесса ТХР и геометрических характеристик реактора на показатели процесса конверсии углеводородного топлива.

Особенности работы дизельного двигателя при работе на топливе с добавками синтез-газа и водорода исследованы на экспериментальной установке ДГ 6,5.

Экспериментальная установка ГТД-14-ТХР предназначена для исследования процессов термохимической конверсии углеводородного топлива вторичными ресурсами ГТД.

Выводы.

1. Современные объектно-ориентированные подходы к проектированию предполагают совмещение принципов стратегии функциональной декомпозиции с инкапсуляцией подсистем при теоретических и экспериментальных исследованиях сложных технических систем.

2. Представленная методология экспериментальных исследований позволяет адаптировать имеющуюся экспериментальную базу взаимосвязанных стендов для верификации математических моделей и экспериментальной проверки положения гипотез, положенных в основу научного исследования, направленного на разработку научно-технических основ создания высокоэффективных энергетических комплексов объектов океанотехники и морских судов применением технологии термохимической регенерации тепла вторичных энергоресурсов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гильмияров Е. Б. Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки / Е. Б. Гильмияров, В. В. Цветков // Вестник МГТУ. – 2006. – Том 9. – № 3. – С. 502–513.
2. Чередниченко А. К. Критерии выбора состава установки мобильного энергокомплекса / А. К. Чередниченко // MOTROL. – Lublin - 2010. – Vol 12A. – P. 7–14.
3. Energy Efficiency related Rules and Regulations – EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulations [Электронный ресурс] / Mia Elg. – 2014. – 55 с. – Режим доступа: URL: http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf
4. Чередниченко А. К. Комплексное исследование эффективности судовых энергетических установок газозовов LNG с термохимической регенерацией тепла [Электронный ресурс] / А. К. Чередниченко // Проблемы экологии та енергозбереження в суднобудуванні : IX Міжнар. наук.-техн. конф. : тези доп. – Режим доступу : conference.nuos.edu.ua/catalog/files/lectures/36342.pdf
5. Cherednichenko O. Analysis of efficiency of diesel-gas turbine power plant with thermochemical heat recovery / O. Cherednichenko // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agroclature. – Lublin-Rzeszow, 2015. – vol. 17, № 2. – P. 25–28
6. Тимошевский Б. Г. Моторные топлива для полимерного сырья: производство и применение / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач – К. : День печати. - 290 с.
7. Тимошевский Б. Г. Экспериментальное исследование особенностей работы искрового ДВС с системой термохимической паровой конверсии биоэтанола / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Митрофанов [и др.] // Motrol. – 2013. – Vol. 15, nr 2. – С. 157–163.
8. Тимошевский Б. Г. Эффективность термохимической конверсии углеводородных топлив применяемых в ДВС / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин // Вісник НУК. – 2011. – № 3. – С. 36–42.
9. Тимошевский Б. Г. Экспериментальне дослідження параметрів поршневого ДВЗ із системою термохімічної конверсії біоетанолу / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2011. – № 2. – С. 3–8.
10. Gaspar H. M., Ross A., Rhodes D.H., Erikstad S. O., Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design. Int'l Maritime Design Conference, Glasgow, UK, June 2012.
11. Erikstad, S.O., Solem S., Fagerholt K., «A Ship Design and Deployment Model for Non-Transport Vessels» Ship Technology Research, vol 58, no 3, september 2011, pp 132-141.
12. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация тепло-энергетических установок / Л. С. Попырин. – М. : Энергия, 1978. – 415 с.

REFERENCES

1. Gilmiyarov, E. B. (2006). *Mnogokriterialnyi podhod k vyboru sudovoy energeticheskoy ustanovki. Vestnik MGTU*, 3, 502-513.
2. Cherednichenko, A. K. (2010). *Kriterii vyibora sostava ustanovki mobilnogo energokompleksa. MOTROL*, 12A, 7-14
3. Energy Efficiency related Rules and Regulations – EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulations (2014). laradi.fi. Retrieved from http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf
4. Cherednichenko, A. K. (2016). *Kompleksnoe issledovanie effektivnosti sudovyih energeticheskikh ustanovok gazozovov LNG s termohimicheskoy regeneratsiey tepla. Problemi ekologii ta energozberezhennya v sudnobuduvanni . IX Mizhnarodna nauk.-tech. konf. www.nuos.edu.ua* Retrieved from conference.nuos.edu.ua/catalog/files/lectures/36342.pdf
5. Cherednichenko, O. (2015). *Analysis of efficiency of diesel-gas turbine power plant with thermochemical heat recovery. MOTROL*, vol. 17, 25–28

6. Timoshevskij, B.G., Tkach, M.R. (2011). *Motornye topliva iz polimernogo syr'ja : proizvodstvo i primenenie*. Kiev. Den' pechati.
7. Timoshevskij, B.G., Tkach, M.R., Mitrofanov O.S. (2013). Eksperimentalnoe issledovanie osobennostey raboty iskrovogo DVS s sistemoy termohimicheskoy parovoy konversii bioetanola. *MOTROL, vol. 15, 157–163*
8. Timoshevskij, B.G., Tkach, M.R., Proskurin A.Y. (2011). Effektivnost termohimicheskoy konversii uglevodorodnykh topliv primenyaemykh v DVS. *Visnik NUK, 3, 36-42*.
9. Timoshevskij, B.G., Tkach, M.R., Mitrofanov O.S. (2011). Eksperimentalne doslidzhennia parametriv porshnevoho DVZ iz systemoiu termokhimichnoi konversii bioetanolu. *DVS, 2, 3-8*.
10. Gaspar H. M., Ross A., Rhodes D.H., Erikstad S. O. (2012). Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design. *Int'l Maritime Design Conference, Glasgow, UK, June*.
11. Erikstad, S.O., Solem, S., Fagerholt, K. (2011). A Ship Design and Deployment Model for Non-Transport Vessels. *Ship Technology Research, vol 58, 132-141*.
12. Попырин Л. С. (1978). *Математическое моделирование и оптимизация тепло-энергетических установок*. Москва : Энергия.

Чередниченко О. К. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ІЗ ТЕРМОХІМІЧНОЮ РЕГЕНЕРАЦІЄЮ СКИДНОГО ТЕПЛА

У даній статті обговорюються методологічні аспекти експериментальних досліджень при оцінці ефективності застосування термохімічної регенерації скидного тепла в енергетичних комплексах. Основною метою даної роботи є розробка методології комплексного експериментального дослідження параметрів і показників енергетичних установок при перевірці адекватності розроблених математичних моделей. У статті узагальнені завдання та сформульовані етапи комплексного експериментального дослідження параметрів енергетичної установки. Запропоновано застосувати принцип багаторівневої декомпозиції у сполученні з інкапсуляцією при експериментальному дослідженні. Наведено приклад реалізації даного принципу при експериментальному дослідженні характеристик комбінованої дизель-газотурбінної установки з термохімічною регенерацією скидного тепла. Дано характеристики експериментальних стендів і комп'ютеризованої системи вимірювань параметрів.

Ключові слова: експериментальне дослідження, критерій, газотурбінний двигун, термохімічна регенерація тепла, декомпозиція, інкапсуляція.

Cherednichenko A. K. METHODOLOGICAL SUPPORT FOR RESEARCH OF THERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY POWER PLANT ELEMENTS

This article discusses the methodological aspects of experimental research in the evaluation of the effectiveness of the thermochemical regeneration of waste heat in power plants. The main purpose of this work is to develop a methodology for comprehensive experimental study of the parameters and indicators of power plants while checking the adequacy of the developed mathematical models. The article summarizes the problem and formulated the complex stages of an experimental study of the parameters of the power plant. It is proposed to apply the principle of multilevel decomposition in combination with encapsulation in an experimental study. This article consist the example of the implementation of the principle characteristics of the experimental study of combined diesel-gas turbine plant with a thermochemical regeneration of waste heat, characteristics of experimental facilities and a computerized measurement system.

Keywords: experimental research, a criterion, a gas turbine engine, thermochemical heat recovery, decomposition, encapsulation/

© Чердніченко О. К.

Статтю прийнято
до редакції 12.05.16