

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический
и производственный журнал**

(22) 5 / 2020

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года

Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	PIETRO ZUNINO
Заместитель главного редактора	АХМЕТОВА И.Г.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	БАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ООО «45», г. Казань,
Адрес типографии:	420015, г. Казань, ул. Жуковского, 28а, помещ.1

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2020
Т.22, № 5
Сентябрь-октябрь

ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Министерство образования и науки РФ
Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В журнале публикуются работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы. Язык публикаций: русский, английский.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АРАКЕЛЯН Э.К.	МИНУЛЛИН Р.Г.	KURTH STEFFEN
БАРТОЛОМЕЙ П.И.	ОЛЬХОВСКИЙ Г.Г.	KOLCUN MICHAIL
БРОДОВ Ю.М.	ПОПОВ И.А.	BIANCHINI ALESSANDRO
БУХМИРОВ В.В.	СЕРГЕЕВ В.В.	FERRARA GIOVANNI
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.	ТЮТИКОВ В.В.	SIMONI DANIELE
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ В.А.	ФЕДОТОВ А.И.	SKODA RADEK
ГУМЕРОВ Ф.Х.	ФРОЛОВ В.Я.	TOMAN PETR
ВАНЬКОВ Ю.В.	ЧИЧИРОВА Н.Д.	DESHPANDE PRAVIN
ИВШИН И.В.	КОРОВКИН Н.В.	VAKKILAINEN ESA
КОЗЛОВ В.К.	ЩИННИКОВ П.А.	RASSÖLKIN ANTON
ЛАПТЕВ А.Г.	ЩУКИН А.В.	BOYADJIEV CHRISTO
ЛЕУХИН А.Н.	ЯКИМОВ Н.Д.	BURGANOV BULAT

Свидетельство о регистрации СМИ:

журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2020
Vol. 22, № 5
September-October
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: PIETRO ZUNINO

The journal covers fundamental and applied research, as well as discussion issues on power engineering and related industries and science.

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials. Language of publications: Russian, English.

Sections:

POWER ENGINEERING

ELECTRIC ENGINEERING

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND
SYSTEMS

Editorial board:

RASHID Z. AMINOV
EDIK K. ARAKELYAN
PETR I. BAROLOMEI
YURY M. BRODOV
VYACHESLAV V. BUKHMIROV
ALEXANDER V. GOLENISHCHEV-
KUTUZOV
VADIM A. GOLENISHCHEV-
KUTUZOV
FARID M. GUMEROV
LEUKHIN A.N.
YURY V. VANKOV
IGOR V. IVSHIN
VLADIMIR K. KOZLOV

VITALIY V. SERGEEV
VLADIMIR V. TYUTIKOV
ALEXANDER I. FEDOTOV
NATALIA D. CHICHIROVA
ANATOLY G. LAPTEV
GUZEL R. MINGALEEVA
RENAT G. MINULLIN
GURGEN G. OLKHOVSKY
IGOR AI. POPOV
PAVEL A. SHCHINNIKOV
ANDREY V. SHCHUKIN
EMIL V. SHAMSUTDINOV
NIKOLAI D. YAKIMOV

BIANCHINI ALESSANDRO
FERRARA GIOVANNI
SIMONI DANIELE
SKODA RADEK
TOMAN PETR
DESHPANDE PRAVIN
VAKKILAINEN ESA
RASSÖLKIN ANTON
BOYADJIEV CHRISTO
BULAT BURGANOVA
NIKOLAI V. KOROVKIN
CHRISTO B. BOYADJIEV
STEFFEN KURTH
MICHAEL KOLCUN

Address

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation

Tel./fax:

+7 (843) 527-92-76

Email:

problems_ener@mail.ru

Site:

<https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

МЕХТИЕВ А.Д., АЛЬКИНА А.Д., ЮГАЙ В.В., ЕСЕНЖОЛОВ У.С., КАЛИАСКАРОВ Н.Б. Сравнительный анализ и перспективы использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов.	3
ГУЖОВ С.В. Прогнозирование спроса на тепловую энергию для зданий средних образовательных учреждений на основании свойств гетероморфизма их энергосистем.	18
МЕЛАМЕД Л.Э. Метод встроенных решений в моделировании турбулентности.	28
МАРЬИН Г.Е., ОСИПОВ Б.М., ЗУНИНО П., МЕНДЕЛЕЕВ Д.И. Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки.	41
ПЕТРУЩЕНКОВ В.А., КОРШАКОВА И.А. Качественный и количественный анализ тепловой энергетики малых мощностей в России.	52
КИКОТЬ Е.А., ГАЗИЗОВ Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения.	71
ДОНСКОЙ И.Г. Математическое моделирование термического разложения смолистых веществ в процессе обращенной газификации растительной биомассы.	83
ШПАКОВСКИЙ Р.П. Исследование испарения в пограничный слой.	94
НГУЕН ЗУИ ХЫНГ., НОВИКОВ В.Ф. Проблема определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле хроматографическими методами.	107
ДАНИЛОВ М.И., РОМАНЕНКО И.Г. Оперативный расчет потерь электроэнергии в сети с неизвестными параметрами в АИИС КУЭ.	116
ДАНИЛЬЧИК Е.С., СУХОЦКИЙ А.Б., КУНТЫШ В.Б. Экспериментальные исследования эффективности однорядного пучка из биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом.	128

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

МАЛЁВ Н.А., МУХАМЕТШИН А.И., ПОГОДИЦКИЙ О.В., ЧИЧКОВ П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока.	142
--	-----

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

MEKHTIYEV AD, AL'KINA AD, YUGAY VV, ESENZHOLOV US, KALIASKAROV NB. Comparative analysis and prospects of the use of multi-fuel micro-thermal power stations on the basis of the steeling engine for rural areas.	3
GUZHOV SV. Forecast of demand for thermal energy for buildings of secondary educational institutions based on the properties of heteromorphism of their energy systems.	18
MELAMED LE. Built-in turbulence modelling solution method.	28
MARIN GE, MENDELEEV DI, OSIPOV BM, ZUNINO P. Influence of fuel composition on energy parameters of gas turbine plant.	41
PETRUSHCHENKOV VA, KORSHAKOVA IA. Qualitative and quantitative analysis of small-scale thermal energy in Russia.	52
KIKOT EA, GAZIZOV FN. Selection of the structure of thermal generation in cities of the Russian federation when actualizing the heat supply schemes.	71
DONSKOY IG. Mathematical modeling of thermal decomposition of resins in the process of reversed gasification of plant biomass.	83
SHPAKOVSKII RP. Investigation of the evaporation in the boundary layer.	94
NGUYEN DH, NOVIKOV VF. The problem of determining the antioxidant additive in transformer oil by chromatographic methods.	107
DANILOV MI, ROMANENKO IG. Operative calculation of electric power losses in the network with unknown parameters in AIMS EMA.	116
DANIL'CHIK ES, SUKHOTSKI AB, KUNTYSH VB. Experimental studies of the efficiency of a single-row bundle of bimetallic finned tubes with different finning heights in free convective heat exchange with air.	128

ELECTRICAL ENGINEERING

MALEV NA, MUKHAMETSHIN AI, POGODITSKY OV, CHICHKOV PV. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters.	142
--	-----

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОТОПЛИВНЫХ МИКРО ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА ДЛЯ СЕЛЬСКИХ РАЙОНОВ

А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина, В.В. Югай,
У.С. Есенжолов, Н.Б. Калиаскаров

Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Казахстан

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>, <https://orcid.org/0000-0003-4879-5593>,
<https://orcid.org/0000-0002-7249-2345>, <https://orcid.org/0000-0003-2536-6810>,
<https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Проведение сравнительного анализа проблем эффективного электроснабжения сельских потребителей. Предложение решений проблем путем использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов. Обоснование и описание перспектив использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов. *МЕТОДЫ.* Проведен научный анализ современного состояния и уровня развития альтернативных источников на основе двигателя с внешним подводом теплоты, работающий по термодинамическому циклу Стирлинга. Используются методы компьютерного моделирования термодинамических процессов многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя с внешним подводом теплоты. Разработан метод компьютерной симуляции, позволяющий построить PV диаграмму и визуализировать процессы изменения давления и объема рабочего тела зависимостей от положения рабочего поршня и вытеснителя. Используются математические методы анализа и описания термодинамического цикла двигателя с внешним подводом теплоты. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Выполнен анализ достижений и уровня современных достижений в области микро электростанций. Установлено направление развития научных исследований по разработке двигателя с внешним подводом тепла. Приведены некоторые результаты исследований по эффективности работы двигателя с внешним подводом теплоты. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Одним из решений проблемы эффективного электроснабжения сельских потребителей может быть внедрения микро тепловых электростанций. Их использование позволит снизить стоимость электроэнергии и обеспечить ее бесперебойную поставку. Основой микро тепловой электростанции является двигатель с внешним подводом теплоты, работающий по термодинамическому циклу Стирлинга.

Ключевые слова: Тепловая электростанция, двигатель Стирлинга, когенерация, электроснабжение, теплоснабжение, альтернативная энергетика, тепловой двигатель.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по грантовому финансированию на 2018-2020 г. проекта ИРН AP05131751 НТП «Микро тепловая электростанция когерационного типа с рекуперацией тепла».

Для цитирования: Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В., Есенжолов У.С., Калиаскаров Н.Б. Сравнительный анализ и перспективы использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 3-17. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-3-17.

COMPARATIVE ANALYSIS AND PROSPECTS OF THE USE OF MULTI-FUEL MICRO-THERMAL POWER STATIONS ON THE BASIS OF THE STEELING ENGINE FOR RURAL AREAS

AD. Mekhtiyev, AD. Al'kina, VV. Yugay,
US. Esenzholov, NB. Kaliaskarov

Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>, <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>, <https://orcid.org/0000-0002-7249-2345>, <https://orcid.org/0000-0003-2536-6810>,
<https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

Abstract: *THE PURPOSE.* Conducting a comparative analysis of the problems of efficient power supply for rural consumers. Offering solution to problems by using multi-fuel micro-thermal power plants based on the Stirling engine for rural areas. Justification and description of prospects for the use of multi-fuel micro-thermal power plants based on the Stirling engine for rural areas. *METHODS.* Methods of computer simulation of thermodynamic processes of multi-fuel micro-thermal power plants based on an engine with external heat supply are used. A computer simulation method has been developed that allows constructing a PV diagram and processes of changes in the pressure and volume of the working fluid depending on the position of the working piston and the displacer. Mathematical methods of analysis and description of the thermodynamic cycle of an engine with external heat supply are used. *RESULTS.* Выполнен анализ достижений и уровня современных достижений в области микро электростанций. Установлено направление развития научных исследований по разработке двигателя с внешним подводом тепла. Приведены некоторые результаты исследований по эффективности работы двигателя с внешним подводом теплоты. *CONCLUSIONS.* Одним из решений проблемы эффективного электроснабжения сельских потребителей может быть внедрения микро тепловых электростанций. Их использование позволит снизить стоимость электроэнергии и обеспечить ее бесперебойную поставку. Основой микро тепловой электростанции является двигатель с внешним подводом теплоты, работающий по принципу Стирлинга.

Keywords: Thermal power station, Stirling engine, cogeneration, power supply, heat supply, alternative energy, heat engine.

For citation: Mekhtiyev AD, Al'kina AD, Yugay VV, Esenzholov US, Kaliaskarov NB. Comparative analysis and prospects of the use of multi-fuel micro-thermal power stations on the basis of the steeling engine for rural areas. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):3-17. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-3-17.

Введение

Еще полностью не решена проблемой электроснабжения удаленных потребителей, когда прокладка линии электропередачи сопряжена со значительными затратами, которые не могут окупиться в течении длительного времени или вовсе. Для решения данной проблемы можно использовать альтернативные источники энергии, например, ветрогенераторы и солнечные модули, которые могут обеспечить удаленного потребителя достаточным количеством энергии, но не все так просто, стоимость первоначальных вложений очень высока и срок окупаемости может составлять более 10 лет, нет полной гарантии что приобретенные солнечные модули не деградируют или не выйдут из строя. Необходимость в использовании накопителей сильно повышает стоимость солнечной электростанции в целом. Вырабатываемая мощность ветрогенератора и солнечной электростанции сильно зависит от погодных условий и поэтому их трудно регулировать и рассчитывать на сбалансированную работу не приходится. В данной статье мы не будем обсуждать достоинства и недостатки данных источников энергии, так как об это много уже написано [1]. Не все гладко и безоблачно с их эксплуатацией. Есть еще важный момент, касающийся их стоимости, например, солнечный комплект "Коттедж" 5000 (Вт), обойдется в 4 млн тенге, без монтажа и доставки по Казахстану. Есть варианты найти и дешевле, но нет гарантии качества или собрать самостоятельно из купленных солнечных

модулей Китайского производства. Тоже самое положение будет с приобретением и монтажом ветрогенератора мощностью 5 кВт, по сравнению с солнечными модулями этот источник обойдется дешевле процентов на 10-15. Просто данные источники не по карману фермеру и сельскому жителю, поэтому они не находят в отдаленных селениях широкого применения. Можно использовать тривиальный подход, основанный на известных принципах генерации электрической энергии на месте при помощи электростанции с двигателем внутреннего сгорания. Сотни различных марок таких электростанций выпускаются по всему миру их можно свободно купить в фирменных магазинах и на рынке. Их конструкция достаточно отработанная и можно сказать условно надежная, но они отличаются друг от друга по качеству и стоимости. Примерно схожи по своим показателям производительности, например, электрогенератор номинальной мощностью 5кВт с бензиновым двигателем внутреннего (далее ДВС) сгорания *HONDA* потребляет 2,2 литра за один час работы, около 440 граммов бензина марки АИ – 92 (по характеристикам производителя стоит), что обойдется потребителю в 75 тенге за один кВт·ч, но житель Караганды заплатит за то же кВт/ч больше чем в пять раз меньше. Есть множество предложений от различных производителей из Китая и России, некоторые из испытанных нами расходовали примерно от 500 до 600 г бензина АИ – 92, при различной загрузке. Соответственно необходимо вложить определенные средства, например, бензиновый генератор *Mateus 6500 HOME* (Кипр) выполненным по технологии *HONDA*, номинальной мощностью 5 кВт, обойдется примерно в 180000 тенге. Намного экономичнее выглядят дизельные электрогенераторы, но их стоимость выше, например, электростанция номинальной мощностью 5,5 кВт с дизельным двигателем *HYUNDAI DHG7500*, стоит около 580000 тенге, конечно дизельный двигатель более экономичный. На один кВтч выработанной энергии он будет расходовать 280-350 г топлива в зависимости от загрузки и условий эксплуатации. Зная эту особенность, производители ставят цену на дизельные генераторы гораздо выше, чем на бензиновые.

В последние 10 лет на Европейских странах появились микро и нано тепловые электростанции следующих мощностей: до 1 кВт; 1-2,5 кВт; 3-7,5 кВт; 8-14,5 кВт; 15-20 кВт; 20,5-50 кВт. Различный диапазон мощности позволяет им удовлетворить потребности практически любого сельского потребителя. Электрический КПД на уровне 15...25%, коэффициент использования топлива до 70...80%. В основе энергоисточника может быть двигатель Стирлинга, карбюраторный двигатель по циклу Отто, паровой двигатель внешнего сгорания с двумя свободными поршнями, топливные элементы. Микро тепловая электростанция (далее МТЭС) имеет низкий уровень шума, что позволяет размещать ее не посредственно в доме. В качестве топлива преимущественно используется газ, жидкие углеводороды, но есть различные модификации способные работать на твердом топливе, в том числе, пеллеты. Анализ показал, что средняя стоимость МТЭС (*Ecopower, WhisperGen, Microgen, Lion-Powerblock, EcoGen*) в зависимости от их электрической мощности (1 – 20 кВт) составляет около 10 тыс. евро за кВт. Например, фирма *Ecopower* (США) продала в Европе за последние 5 лет, главным образом в Великобритании, около 5 тыс. МТЭС на базе одноцилиндрового четырехтактного двигателя внутреннего сгорания мощностью 3 кВт. Стоимость от 6 тыс. евро. Тепловая мощность нагрева воды – 12 кВт, температура нагреваемой воды не превышает 40-50 °С. Поэтому производители рекомендуют использовать микро-ТЭС совместно с водяными теплыми полами вместо традиционных радиаторов. Аналогичные агрегаты *Dachs* производит фирма *Senertec* [2]. На внутреннем рынке Японии уже год представлена модульная микро-когенерационная установка фирмы *Honda* электрической мощностью 1 кВт и тепловой 3,25 кВт.

Основой МТЭС, является, одноцилиндровый четырёхтактный мотор с присоединённым к нему генератором. Для теплоснабжения используется тепло системы охлаждения и энергия выхлопных газов двигателя. Тепловой КПД установки достигает 60%, что вместе с электрическим КПД в 20%, позволяет достичь суммарного коэффициента использования топлива в 80%.

Мощность МТЭС рассчитана из условия обеспечения средней электро- и тепловой нагрузки частного дома. Для покрытия пиковых нагрузок предполагается использовать дополнительные системы. Так, для покрытия повышенных тепловых нагрузок (отопление и горячая вода) наиболее эффективной является комбинация установки с газовым котлом. Пики электрической нагрузки должна брать на себя центральная сеть. Через это же соединение излишки произведённой электроэнергии могут передаваться в электросеть [3].

Мы предлагаем немного другой путь решения проблемы эффективного

энергоснабжения удаленных сельских потребителей. Проведя анализ мировых разработок электрических генераторов и микро тепловых электростанций, показал, что сегодня есть альтернатива двигателю внутреннего сгорания двигатель Стирлинга (ДС). Его создателем является пастор Р. Стирлингом, который получил на него патент в 1817 году. В первоначальном виде он весил более тонны и развивал мощность около 1000 Вт, его большим недостатком являлось значительная металлоёмкость и низкий КПД в пределах 4%, но на то время его преимуществом была безопасность и простота конструкции, в отличие от паровой машины. Понадобилось 20 лет чтобы его доработать, обеспечить его герметичность и повысить его эффективность за счет использования регенератора. В дальнейшем Р. Стирлинг получил патент на тепловой двигатель с закрытым циклом и регенератором (аккумулятор тепла), который накапливал и отдавал рабочему телу тепловую энергию при различных частях термодинамического цикла. Все это позволило увеличить КПД до 10 % и уменьшить его вес практически в двое. Используя принцип работы двигателя Стирлинга, инженеры и изобретатели разработали различные его модификации [4]. Двигатель Р. Стирлинга не смог оказать паровой машины, паровой турбиной и двигателю внутреннего сгорания. Все эти двигатели имели лучше показатель по КПД и отношению «вес/габарит/мощность». Развитие ДВС и электродвигателей в начале 20 века сделал нерентабельным их производство. С течением времени в 50 - 60 годы прошлого века, инженеры снова взялись за разработки новых конструкций и эти разработки выдуться и сегодня. Есть значительные достижения в данной сфере, например, фирма *Philips* производившая компактные электрогенераторы на основе двигателя с внешним подводом теплоты работающий по циклу Стирлинга добилась КПД более 40 %, что пока не достижимо для современного ДВС [5]. Еще больший КПД показал, так называемый «Солнечный Стирлинг» фирмы *Philips*, с КПД около 45 %, что тоже не достижимо для солнечных модулей выполненных на основе кремния.

Если использовать в МТЭС тепловой двигатель с внешним подводом теплоты, работающий по принципу Р.Стирлинга, то можно получить весьма перспективный агрегат, который производит электрическую и тепловую энергию. В прошлом веке разработаны множество модификаций двигателя с внешним подводом теплоты работающий по циклу Стирлинга с участием зарубежных фирм *Philips*, *STM Inc.*, *DaimierBenz*, *Solo*, *UnitedStirling*, выпущены серийные образцы, которые эксплуатировались на транспорте, быту и сельском хозяйстве, есть передовые разработки для подводных лодок и космических кораблей [6]. В этом направлении на протяжении прошлого века и по настоящий момент зарубежными компания сделано очень много, в плане развития данной технологии. Сегодня в Казахстане подобные научные разработки не ведутся, нет также действующих образцов разработанных учеными, есть только отдельные энтузиасты, собравшие небольших моделей, которые не способны обеспечить энергией не только крестьянское хозяйство, но и небольшой сельский дом. Все работы производятся разрозненно, а разработчики не имеют связи между собой. Основной их разработок является информация, полученная из интернета, которая не позволяет создать эффективную МТЭС с высокими техническими характеристиками.

За рубежом напротив имеются разработки МТЭС с высокими технико-экономическими показателями и характеристиками. Для потребителей с небольшой потребляемой мощности предлагается МТЭС на основе ДС, *VIESSMANN — VITOTWIN 300-W* (Германия), которая способная производить тепловую и электрическую энергию (рис. 1).

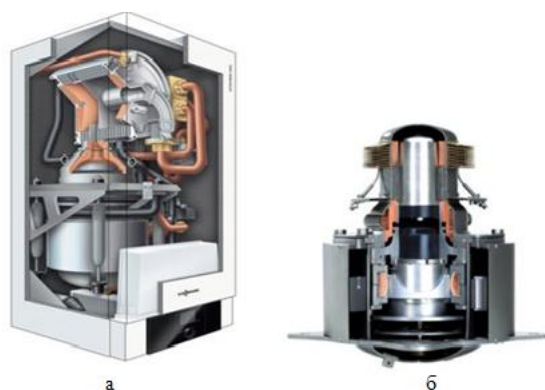


Рис. 1. МТЭС с двигателем Стирлинга: а) разрез МТЭС; б) разрез ДС

Таким образом, агрегат занимает в кухне столько же места, сколько стандартная посудомоечная машина. Для сравнения: габариты американской МТЭС *Ecopower* (Д × В × Ш) – 1280 × 980 × 700 мм, масса – 400 кг.

Электростанция подойдет как для энергоснабжения сельского дома, так и для загородного коттеджа. Правда она способна работать только на природном или сжиженном газе. Ее стоимость составляет около 11 тысяч евро. Преимущества агрегата состоят в экономичности, низком уровне создаваемого при работе шума. Установка любой МТЭС, это в первую очередь работа на перспективу. Учитывая достаточно высокую стоимость оборудования, целесообразно коллективное применение данных агрегатов [7]. Компании *WhisperGen* (Новая Зеландия) разработала для Европейского рынка МТЭС с тепловым двигателем внешнего сгорания Стирлинга, стоимостью около 7 тыс. евро, электрическая мощность – 1 кВт, тепловая – 5,5 кВт. Фирма *Microgen* (Великобритания) выпускает аналогичные по конструкции МТЭС. Их отличает бесшумность работы, по сравнению с уровнем шума на расстоянии 2 м от работающей *Ecopower* составляет 56 дБ (ДВС), а при аналогичных условиях для *WhisperGen* – не более 40 дБ (ДС). Это позволяет устанавливать *WhisperGen* внутри дома, так как создаваемый ей шум не выше шума бытового холодильника. Оптимальное для средневропейского дома количество вырабатываемой горячей воды; Размеры установки, например, *WhisperGen* (В × Ш × Д) составляют 650 × 500 × 450 мм, масса 137 кг (рис. 2).



Рис. 2. МТЭС *WhisperGen* с двигателем Стирлинга

Отсутствие техобслуживания (ресурс работы – до 40 тыс. ч): в них нет масла внутри цилиндра, нет фильтров и свечей зажигания, не надо регулировать клапаны и систему зажигания. Для ДВС американской установки после 8 тыс. ч необходим ремонт.

Топливная «всеядность», это важное преимущество двигателя Стирлинга, он способен использовать разные виды газообразного, жидкого и твердого топлива. Совместно с МТЭС сельский потребитель может использовать вакуумные коллекторы и солнечные фото панели (альтернативные источники тепла и электроэнергии). В зимний период эффективность работы фото панелей весьма низкая, но ее достаточно для того, чтобы обеспечить действие циркуляционных насосов, поддерживающих движение воды в системе ГВС, нагретой от вакуумных коллекторов. Летом, когда солнечные фотоэлектрические панели функционируют с максимальной отдачей электроэнергии, можно ограничить время работы МТЭС, сэкономить газообразное топливо и сберечь моторесурс двигателя. В Нюрнберге фирма *Sunmachine* (Германия) производит когенерационные МТЭС электрической мощностью 3 кВт с двигателем Стирлинга, работающим на пеллетах (рис. 3). Аналогичные МТЭС выпускает фирма KWB (Австрия, Ирландия). Двигателем Стирлинга фирмы *Microgen* комплектуется конденсационный газовый котел фирмы *Remeha*, “*Remeha-HRE*”. Аналогичные МТЭС выпускают фирмы *KIRSCH*, *Viessmann*, *Baxi* – *Ecogen*.



Рис. 3. Микро-ТЭЦ на древесных галетах

На рис. 4 приведены данные по сравнительному анализу КПД современных тепловых двигателей, выпускаемых промышленностью. Использование ДС позволит создать многотопливную МТЭС с более высокими показателями производства тепловой энергии, чем при использовании ДВС. ДС имеет ряд преимуществ и недостатков [8], но его использование в качестве силового агрегата для МТЭС весьма предпочтительно.

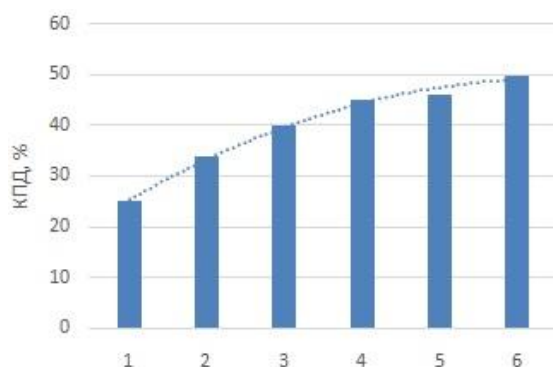


Рис. 4. Сравнительный анализ КПД различных типов двигателя:

1 – бензиновый ДВС; 2 – газотурбинная установка; 3 – атмосферный дизельный ДВС, 4 – двигатель Стирлинга (высокого давления); 5 – реактивный двигатель; 6 – дизельный ДВС с турбонаддувом

Эффективность применения свободнопоршневого двигателя Стирлинга

Проведя анализ источников [9-10] Для будущей МЭТС используется ДС свободно поршневого типа [9-10], которые будут нами сначала отработаны на лабораторных моделях мощностью до 100 Вт, затем постепенным приближением будем двигаться к прототипу мощность которого составляет 1 кВт. Поршневые ДВС при своей дешевизне и высокой электрической эффективности имеют малую тепловую мощность, требуют применения масла в цилиндрах и содержат в своем составе большое количество трущихся элементов, что приводит к малому ресурсу работы. Классические двигатели Стирлинга более массивные, материалоемкие и работают под высоким давлением рабочего тела [11-12], но свободнопоршневой тип обладает рядом преимуществ и в первую очередь отсутствие массивного маховика с кривошипно-шатунным механизмом, также поршень и вытеснитель находятся в герметичном корпусе, что решает ряд проблем с уплотнениями [13-14].

Для достижения цели необходимо выполнить ряд мероприятий, связанных с совершенствованием конструкции описанных в [15] и их адаптация к Казахстанским условиям эксплуатации на доступном в сельских регионах топливе. Необходимо отметить, что современные свободнопоршневые ДС, имеют много достоинств: низкий уровень шума, многотопливность, простота конструкции (нет поршней, каленвала,

распредвала и другие), значительный ресурс (более 40 тыс. часов), высокий КПД, возможность когенерация, а отсутствие, зажигания, высоковольтных проводов, коробки передач, стартера с аккумулятором делают его удобным в эксплуатации. Нашей задачей является создание МТЭС с ДС без вращающихся частей, высокий значением электрического КПД, низкий уровень выбросов вредных веществ. В перспективе будет создание принципиально нового типа акустической МТЭС, которая способна с помощью звуковых колебаний превращать тепловую энергию в электричество.

Технологическая схема микро тепловой электростанции.

Эффективность применения свободнопоршневого двигателя Стирлинга в когенерационных установках, по сравнению с ДВС, обусловлена особенностью его теплового баланса. На рис. 5 показана компоновка многотопливной микроэлектростанции мощностью в 1 кВт с двигателем с внешним подводом теплоты, в трех возможных вариантах, основанных на использовании энергосберегающего эффекта «Тандыра». Данная установка производит 1 кВт/ч электрической энергии и 5-6 кВт/ч тепловой, что в полнее достаточно для небольшого сельского дома. Контур охлаждения работает в летнее время, а в холодное время года его заменяет система отопления жилого дома площадью около 70 м². Установка работает на накопительный буфер, который состоит из аккумулятора электрической и тепловой энергии. Накопители позволяют добиться стабильности в ее работе и обеспечить пики максимальной нагрузки, а также сбалансировать объемы произведенной и потребляемой энергии при минимальных потерях. Установка монтируется в печь или «Тандыр», которую предварительно разжигают, возможна также работа установки в длительном режиме с поддержанием процесса горения топлива.

Установка состоит из: свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания 1; линейного генератора переменного тока на постоянных магнитах 2 и кабельной линии 3 с напряжением 220 В. Кабель подключается к преобразователю AC220/DC24В, для зарядки аккумулятора емкостью примерно 200 А/ч; система охлаждения (отопления) 4, чем эффективнее она работает тем выше КПД всей установки; нагреватель рабочего тела 5 из нержавеющей жаропрочной стали; система подвода воздуха 6; основание земли 7; кирпичная кладка из шамотного кирпича 8; трубопровод для системы охлаждения 9; колосниковая решетка 10; бетонное основание печи 11; теплоизоляция 12; обшивка 13; люк для чистки 14; дымоход для удаления продуктов горения 15.

Установка работает следующим образом, под действием высокой температуры от 300 до 700° С силовая установка на основе свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания 1 приводит в движение линейного генератора переменного тока на постоянных магнитах 2, выработанный ток по кабельной линии 3 с напряжением 220 В поступает на преобразователь переменного тока в постоянный AC220/DC24В который имеет контроллер заряда и осуществляет зарядку аккумуляторов минимальной емкостью 200 А/ч, желательно увеличить емкость аккумуляторов в 2-3 раза, для исключения дефицита электроэнергии и избежание аварийного отключения автономной системы при разрядке аккумулятора. Если в доме есть несколько мощных приемников, то необходимо отдельно рассчитать необходимое для их работы емкость.

Постоянный ток может напрямую доставляться потребителям, например, светодиодным электрическим лампам и частично инвертироваться для приводов холодильника и стиральной машины. Важным моментом эффективной работы установки является система охлаждения (отопления) 4, чем эффективнее она работает, тем выше КПД всей установки, поэтому желательно лучше охлаждать рабочее тело, чем повышать температуру нагревателя. Система охлаждения подключается через трубопроводы 9 и разделяется на прямой и обратный, в качестве охлаждающей жидкости может быть использован автомобильный антифриз. Для циркуляции охлаждающей жидкости используется электрический насос(помпа), а подключение системы отопления дома осуществляется через теплообменный аппарат. Для хранения излишек тепловой энергии необходим бак с тепловой изоляцией емкостью 200 – 500 литров.

Нагреватель рабочего тела 5 непосредственно воспринимает высокую температуру и должен быть выполнен из жаропрочной стали, для повышения эффективности он снабжен дополнительными трубчатыми нагревателями и внутренним регенератором. Для обеспечения процесса горения топлива печь или «Тандыр» должны быть оснащены системой подачи воздуха 6. Важным моментом является конструкция самой печи, главное ее качество должно быть энергосбережение и сохранение тепла, поэтому теплоизоляции уделяется особое внимание.

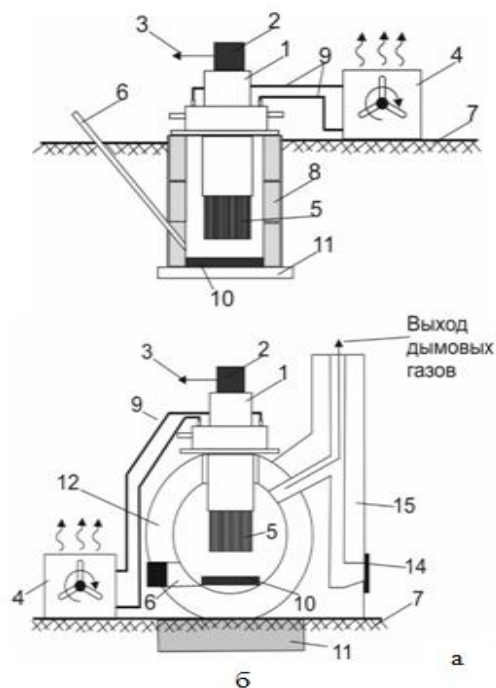


Рис. 5. Возможные варианты компоновки многотопливной МТЭС мощностью в 1 кВт с двигателем с внешним подводом теплоты: а) подземное расположение МТЭС; б) надземное МТЭС

Электрическая схема установки показана на рис. 6, основная идея заключается в разделении нагрузки на переменную и постоянную. Это позволит избежать излишних преобразований и потерь, так как большинство современного бытового электрооборудования работает на постоянном токе, например, ноутбук или сотовый телефон. Светодиодные электрические лампы тоже могут работать на постоянном токе без драйвера. Переменный ток необходим только холодильнику, стиральной машине, микроволновой печи, поэтому для них предусматривается инвертор.

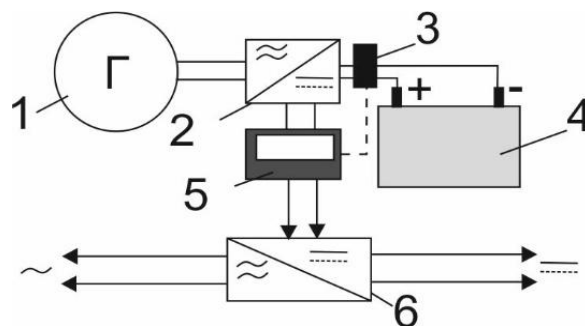


Рис. 6. Электрическая схема генерации

Система выработки электрической энергии состоит из линейного синхронного генератора переменного тока 1, выполненного на постоянных магнитах, полупроводникового выпрямителя переменного тока 2, контроллера заряда аккумулятора с реле 3 и 5, аккумуляторной батареи 4, распределительного устройства 6 для разделения нагрузки на переменный ток с питанием от инвертора и на постоянный ток для питания нагрузки постоянного тока напрямую от аккумуляторной батареи.

Экспериментальная часть

Для проведения исследований нами был разработан экспериментальный свободнопоршневой двигатель с внешним подводом теплоты, представленный на рисунке 7, максимальная мощность линейного электрического генератора на постоянных магнитах составляет 80 Вт. Данная конструкция является наиболее перспективной и эффективной для разработки будущей конструкции МТЭС. Частота колебаний 48-56 Гц. В качестве рабочего тела используется воздух с добавлением небольшого в процентном отношении воды, что позволяет создавать давление до 12 МПа, также можно использовать гелий. Сухой насыщенный пар и вода по кривые насыщения составляет при $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=0,5\text{ МПа.}$, при $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P=1,5\text{ МПа.}$, при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=8,5\text{ МПа.}$, при $T=330\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P=12,8\text{ МПа.}$ Нагрев

осуществлялся газовой горелкой до 5492 ккал (6 кВт). Температура измерялась инфракрасным термометром снаружи цилиндра выше днища на 3 мм. Значения достигали 270-340⁰С. Цилиндр выполнен из медной трубы диаметром 108 мм, с толщиной 1 мм. Диаметр рабочего поршня и вытеснителя 101,8 мм. Длина поршня составляет 120 мм, при длине вытеснителя в 250мм. Требуется использования термоизолированной камеры сгорания, так как значительный объем теплоты открытого пламени горелки рассеивается в окружающей среде. Температура воды с системы охлаждения изменялась от 23 до 34⁰С. Время работы образца составило в пределах 30 минут.

Проведено компьютерное моделирование свободнопоршневого двигателя для создания оптимальной конструкции с максимально возможным КПД. Установлен ряд зависимостей, влияющих на мощность связанных с температурой нагревателя и охладителя, диаметром и ходом поршней, фазой и другими параметрами. Внешний вид образца приведен на рис. 7.



Рис. 7. Экспериментальная лабораторная установка МТЭС
свободнопоршневого типа мощностью 80 Вт: а) Расположение электрического генератора;
б) Подвод тепла при помощи газовой горелки

Свободнопоршневой двигатель работает по такому же принципу, как и двигатель Стирлинга с приводным механизмом. Под действием давления газа в рабочих полостях происходит перемещение поршней, а движение в обратном направлении происходит благодаря силам упругости механической пружины. Жесткая кинематическая связь между поршнями отсутствует. Вытеснитель, по сравнению с рабочим поршнем, обладает меньшей массой. И как следствие опережает рабочий поршень на некоторый фазовый угол. Данное условие является необходимым для получения полезной работы в двигателях, работающих по циклу Стирлинга.

Рабочий процесс в двигателе протекает следующим образом. При запуске двигателя давления газа в рабочих полостях равны между собой. При включении нагревателя происходит повышение температуры и давление газа в полости расширения. Вследствие этого начинается движение вытеснителя, а затем перетекание рабочего тела из холодной полости в горячую. При этом давление газа повышается. Под действием разницы давлений газа в рабочих полостях, вытеснитель продолжает движение, переталкивая рабочее тело в горячую полость. Вследствие возрастания давления начинает движение рабочий поршень. При достижении минимального значения объема полости сжатия, давление газа в рабочих полостях начинает уменьшаться. Перемещение поршней происходит до момента уравнивания сил инерции и действия газовых сил.

Вследствие того, что вытеснительный поршень намного легче рабочего поршня, он первым начинает движение в обратную сторону. При этом рабочий поршень еще продолжает перемещаться. Рабочее тело начинает перетекать из горячей полости в холодную, его давление падает и уменьшается по отношению к силе, проявляемой механической пружиной, это вызывает перемещение рабочего поршня в обратном направлении. Перемещение продолжается до момента выравнивания давлений в полостях несколько дольше за счет действия силы инерции рабочего поршня. Газ при этом начинает перетекать из холодной полости в горячую и цикл повторяется. Полезную работу можно снимать непосредственно с рабочего поршня, преобразуя кинетическую энергию его колебательных движений при помощи соответствующего нагрузочного устройства. В совокупности с линейным электрическим генератором, свободнопоршневой двигатель является автоколебательной системой, которая при определенных обстоятельствах может само запускаться при подведении теплоты к нагревателю. Очевидно, что такой термомеханический генератор обладает рядом уникальных особенностей, которые позволяют разработчикам двигателей с внешним подводом теплоты обходить некоторые специфические трудноразрешимые проблемы, возникающие при создании классических конструкций двигателей Стирлинга с приводными механизмами, например, проблемы уплотнения внутреннего контура и смазки приводного механизма, проблемы создания работоспособного механизма газовой пружины.

Описанные выше автономные электростанции с двигателем ДВС имеют ряд недостатков и не высокий КПД, так как большая часть в них энергии теряется. Если выполнить рекуперацию потерь и направить их на получение тепловой энергии для нагрева теплоносителя системы теплоснабжения, можно отопить в холодное время жилые и производственные помещения. Соответственно, использование когенерационной тепловой электростанции, позволит получить не только электрическую энергию, но и тепловую, в виде нагретой воды. Как отмечалось выше, промышленностью выпускаются дизельные электростанции, но некоторые производители оснащают их когенерационной установкой, что трансформирует ее в микро тепловую электростанцию с тепловой централью (далее ТЭЦ).

Если установить такую электростанцию в частном или производственном помещении можно рекуперировать тепловые потери, характерные для дизельного генератора, для отопления помещений в зимний период времени. ДВС приводит в действие электрический генератор производящий электроэнергию, а тепловая мощность снимается с системы охлаждения двигателя и с выхлопной системы по выбросу продуктов сгорания топлива. Есть проблемы связанные, например, с эксплуатацией дизельных микроТЭЦ, так как требуется ее работа на полную мощность иначе двигатель плохо разогревается и снять с него достаточное количество тепловой энергии не получится.

Предложенный тип двигателя может свободно эксплуатироваться в жилых помещениях, а также эффективно работать практически на любом виде топлива или отходах сельскохозяйственного производства подверженных горению. Для увеличения мощности МТЭС от 1 до 5 кВт вместо линейного генератора на постоянных магнитах будет использоваться много ступенчатая турбина с высокочастотным генератором с регулируемым возбуждением, имеющим малые габариты, по сравнению с тихоходными синхронными генераторами на постоянных магнитах.

Теоретическая основа расчета основных параметров МТЭС на основе свободнопоршневой двигателя с внешним подводом теплоты

Описание физических процессов разработанного свободнопоршневого процесса можно основывать на приведенных выражений в источнике [7-8]. Предложенный свободнопоршневой двигатель для МТЭС работает по известному тепловому циклу двигателя Стирлинга. Предлагается свой вариант расчета физических параметров свободнопоршневого двигателя на основании известных процессов работы двигателя Стирлинга [7-8]. Первоначальным условием является, что движение вытеснителя сдвигается на угол ψ по сравнению с поршнем. Этот угол ψ отрицательный для заднего смещения и положительный для прямого смещения по сравнению с поршнем. Сдвиг вперед обычен для двигателя Стирлинга. То есть, вытеснитель находится над силовым поршнем, вытеснитель предшествует силовому поршню. Максимальная мощность достигается при смещении при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на 90° и минимальная при 0° .

Объем полости с высокой температурой:

$$V_h = \frac{V_d}{2} \cdot (1 - \cos(\phi + \psi)) + V_{\text{мгор}} \quad (1)$$

где V_d – объем вытеснителя, $V_{\text{мгор}}$ – горячий мертвый объем, который содержит нагреватель.

Объем полости с холодной температуры:

$$V_b = \frac{V_m}{2} \cdot (1 - \cos(\alpha)) + \frac{V_d}{2} \cdot (1 + \cos(\phi + \psi)) + V_{\text{мхол}} \cdot V_{\text{общ}} \quad (2)$$

где V_m – объем, охватываемый силовым поршнем, $V_{\text{мхол}}$ – холодный мертвый объем [5...10], который содержит охладитель, $V_{\text{общ}}$ – общий объем, охватываемый двумя поршнями и

$$\frac{V_d}{2} \cdot (1 + \cos(\phi + \psi)) \text{ - холодный объем под вытеснителем.}$$

$$V_{\text{сот}} \text{ и } \frac{V_d}{2} \cdot (1 + \cos(\phi + \psi)) = 0$$

Постоянный объем регенератора V_r в любое время, итоговый объем

$$V = V_h + V_b + V_r \quad (3)$$

и итоговая масса газа

$$m = m_h + m_b + m_r \quad (4)$$

Индексы h , b и r означают объемы при горячей температуре или холодной температуре, и одного из регенераторов

По закону идеального газа мы можем написать все три объема:

$$P \cdot V_h = m_h \cdot R \cdot T_h \quad (5)$$

$$P \cdot V_b = m_b \cdot R \cdot T_c \text{ et} \quad (6)$$

$$P \cdot V_r = m_r \cdot R \cdot (T_{mr} + dt) \quad (7)$$

где dt – разность температур в регенераторе по сравнению с теоретической средней.

Три массы:

$$m_h = \frac{P \cdot V_h}{R \cdot T_h} \quad (8)$$

$$m_b = \frac{P \cdot V_b}{R \cdot T_c \text{ et}} \quad (9)$$

$$m_r = \frac{P \cdot V_r}{R \cdot (T_{mr} + dt)} \quad (10)$$

для, соответственно, холодного объема, горячего объема и объема регенератора.

Итоговая масса газа:

$$m = \frac{P_0 \cdot V_{\text{max}}}{R \cdot T_0} \quad (11)$$

где P_0 , V_{max} и T_0 – давление, объем и температура в момент заполнения газом. Во время этого заполнения внутренний объем максимален. V_{max} рассчитывается как:

$$V_{\text{max}} = V_h + V_b + V_r \quad (12)$$

Заменяя значения масс газа [8] в уравнении (4) на значения, заданные уравнениями (8), (9) и (10), получаем:

$$\frac{P_0 \cdot V_{\max}}{R \cdot T_0} = P \cdot \left(\frac{V_h}{T_h} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_r}{T_{mr} + dt} \right) \quad (13)$$

которое дает нам значение давления:

$$P = \frac{\frac{P_0 \cdot V_{\max}}{R \cdot T_0}}{\left(\frac{V_h}{T_h} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_r}{T_{mr} + dt} \right)} \quad (14)$$

Результаты экспериментов и обсуждение

Отдельно проведены эксперименты, позволяющие построить PV диаграмму замкнутого теплового цикла Карно и рассмотреть зависимость давления и объема при различных положениях поршней. Результаты приведены на рис. 8, 9 и 10. Проведенные исследования позволяют найти оптимальные параметры конструктивных частей теплового двигателя. Точно установить геометрические размеры поршня и вытеснителя, а также величину их хода с оптимальным значением фазового сдвига. Если происходит изменения фазового сдвига с 90° до 0° , то МТЭС перестает производить работу.

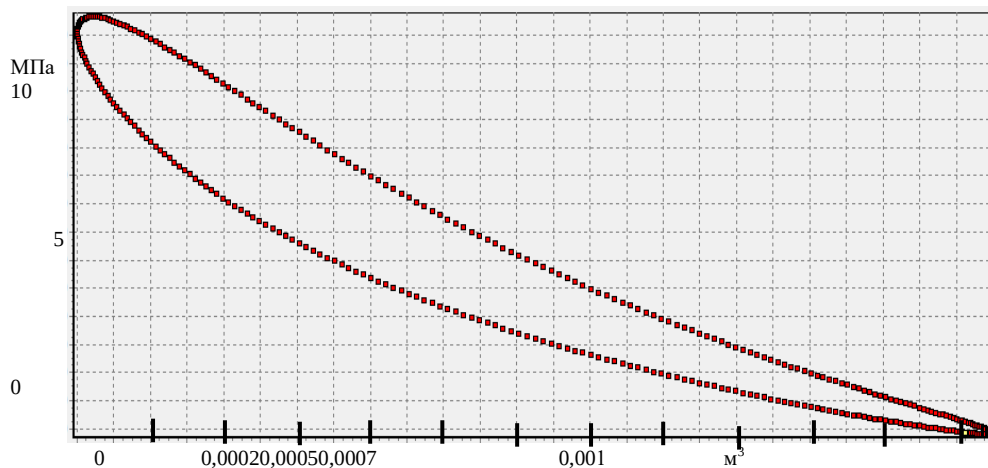


Рис. 8. Зависимости основных параметров свободнопоршневого двигателя при его работе при температуре нагревателя 340°C и охладителя 30°C при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на 90° , при ходе вытеснителя в 3 раза больше чем у поршня

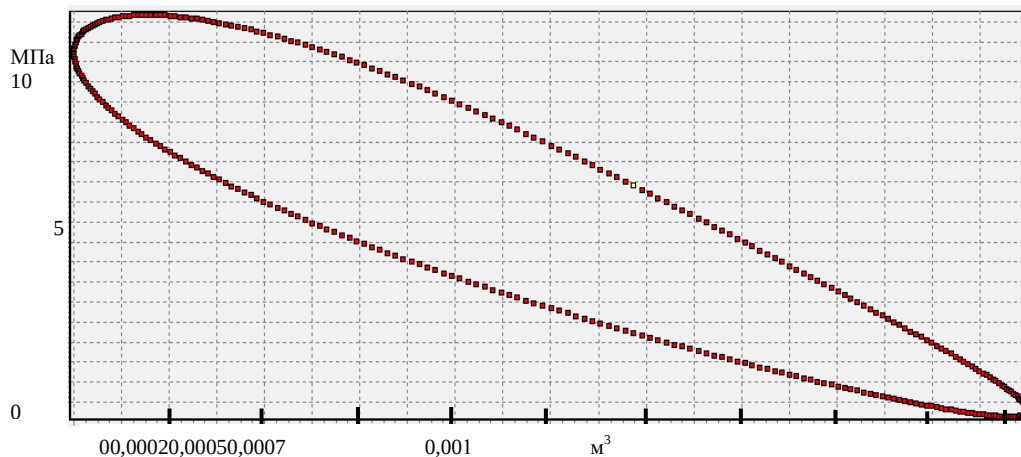


Рис. 9. Зависимости основных параметров свободнопоршневого двигателя при его работе при температуре нагревателя 340°C и охладителя 30°C при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на 90° , при ходе вытеснителя в 6 раза больше чем у поршня

Также можно отметить, что в отличие от идеальной диаграммы p - V зависимости давления и объём рассмотренной характеристики цикла Стирлинга [10] реальный график имеет намного меньшую площадь, соответственно меньший КПД и для его увеличения необходимо увеличить разницу температуры между нагревателем и охладителем, повышение температуры нагревателя более 340°C , что позволит увеличить давление рабочего тела, а также многократное снижение массы вытеснителя и его хода по отношению к рабочему поршню.

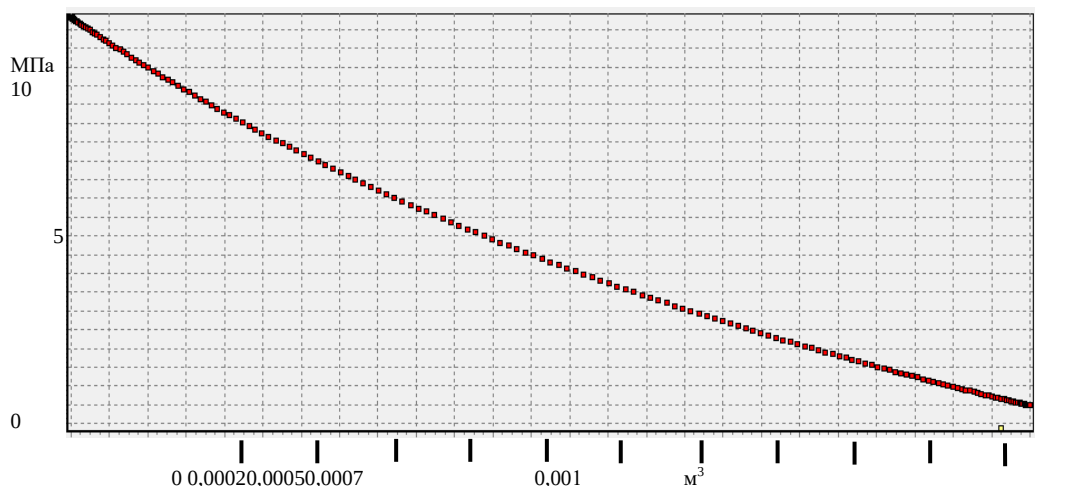


Рис. 10. Зависимости основных параметров свободнопоршневого двигателя при его работе при температуре нагревателя 340°C и охладителя 30°C при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на 0°

Выводы

Для получения значительно большей мощности свободно поршневого двигателя при меньшей массе по сравнению с дизельным ДВС, необходимо достижение давления в пределах 10 МПа, что даст существенные преимущества при использовании свободнопоршневого двигателя с внешним подводом теплоты для многотопливной МТЭС, позволяет ей эффективно работать в условиях сельской местности на доступном топливе и отходах производства. Наиболее перспективной конструкцией привода силового агрегата является свободнопоршневой двигатель с внешним подводом теплоты, по сравнению с классическими конструкциями поршневых Двигателей Стирлинга. Максимальная мощность достигается при смещении при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на 90° и минимальная при 0° , при этом КПД двигателя растет с увеличением хода вытеснителя по отношению к поршню. При этом вытеснитель должен быть минимум в три раза легче чем рабочий поршень, а его ход многократно больше.

Литература

1. Мехтиев А.Д. Эйрих В.И., Югай В.В., и др. Мини-ТЭЦ и миниэлектростанции на основе двигателя Стирлинга для энергообеспечения жилых и промышленных объектов // Международный научный журнал «Актуальные проблемы современности». 2014. №3(5). С. 94–97.
2. Garcia M., Trujillo E., Godino J., et al. Thermodynamic Model for Performance Analysis of a Stirling Engine Prototype// Energies. 2018. V.11. N10.
3. Zare S., Shourangiz-Haghighi A., Tavakolpour-Saleh A. Higher order modeling of a free-piston Stirlingengine: analysis and experiment // International journal of energy and environmental engineering. 2018. V.9. N3. pp. 273-293.
4. Athanasios A., Kolios J., Fidalgo B, et al. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system // Energy conversion and management. 2018. V.165. pp. 528-540.
5. Stamford L., Greening B., Azapagic A. Life cycle environmental and economic sustainability of Stirling engine micro-CHP systems // Energy technology. 2018. V.6. N6. pp. 1119-1138.
6. Egas J., Clucas D. Stirling Engine Configuration Selection // Energies. 2018. V.11. N3.
7. Kaluzhskii D., Mekhtiev A., Alkina A. Title of article. Optimization of the parameters of the synchronous motor for a specialhigh-speed electricdrive. 17th international conference of youngs pecialists on micro/nanotechnologies and electron deviceS (EDM); 30 Jun-04Jul 2016; Novosibirsk: NSTU; 2016.
8. Kaluzhskii D., MakarovD., Mekhtiev A. Title of article. Inductor Motor with Axial Excitation Flux. 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron

devices(EDM); 30 Jun-04Jul 2016; Novosibirsk: NSTU; 2016.

9. Sowale A., Anthony E., Kolios A. Optimisation of a Quasi-Steady Model of a Free-Piston Stirling Engine // *Energies*. 2019. V.12. N1.

10. Шалай В.В., Макушев Ю.П. Двигатель внешнего сгорания // Омский научный вестник. 2018. №1. С.110-114.

11. Волков А.В., Рыженкова А.В., Парыгина А.Г., и др. Проблемы развития автономных когенерационных энергетических комплексов на основе микрогидроэнергетики // *Теплоэнергетика*. 2018. №11. С. 32-39.

12. Эфендиев А.М., Николаев Ю.Е., Евстафьев Д.П. Возможности энергообеспечения фермерских хозяйств на базе малых возобновляемых источников энергии // *Теплоэнергетика*. 2016. №2. С. 38-45.

13. Зиновьев Е.А., Довгялло А.И. Упрощенная методика расчёта термоакустического двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. №3(34). с.206-211.

14. Hamood A., Jaworski A.J., Mao X., et al. Design and construction of a two-stage thermoacoustical electricity generator with push-pull linear alternator // *Energy*. 2018. N.144. pp. 61-72.

15. Wang K., Sun D., Zhang J., et al. An acoustically matched traveling-wave thermoacoustic generator achieving 750 W electric power // *Energy*. 2016. N.103. pp. 313-321.

Авторы публикации

Мехтиев Али Джаваниширович – к.т.н., заведующий кафедрой «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: barton.kz@mail.ru.

Алькина Алия Даулетхановна – магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Измерительная техника и приборостроение», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: alika_1308@mail.ru.

Югай Вячеслав Викторович – д-р PhD., и.о. доцента, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: slawa_v@mail.ru.

Есенжолов Улан Серикович – магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: newneil@mail.ru.

Калиаскаров Нурбол Балтабаевич – магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: 90nurbol@mail.ru.

References

1. Mekhtiyev AD, Eirikh VI, Yugai VV, et al. Mini-TETs i minielektrostantsii na osnove dvigatelya Stirlinga dlya energoobespecheniya zhilykh i promyshlennykh ob'ektov. *Actual problems of modernity*. 2014; 3(5):94-97

2. Garcia M, Trujillo E, Godino J, et al. Thermodynamic Model for Performance Analysis of a Stirling Engine Prototype. *Energies*. 2018;11:10. doi:10.3390/en1102655.

3. Zare S, Shourangiz-Haghighi A, Tavakolpour-Saleh A. Higher order modeling of a free-piston Stirling engine: analysis and experiment. *International journal of energy and environmental engineering*. 2018;9(3):273-293. doi:10.1007/s40095-018-0267-7.

4. Athanasios A, Kolios J, Fidalgo B, et al. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system. *Energy conversion and management*. 2018;165:528–540. doi:10.1016/j.enconman.2018.03.085.

5. Stamford L, Greening B, Azapagic A. Life cycle environmental and economic sustainability of Stirling engine micro-CHP systems. *Energy technology*. 2018;6(6):1119–1138. doi:10.1002/ente.201700854.

6. Egas J, Clucas D. Stirling Engine Configuration Selection. *Energies*. 2018;11(3). doi:10.3390/en11030584.

7. Kaluzhskii D, Mekhtiyev A, Alkina A. Title of article. Optimization of the parameters of the synchronous motor for a special high-speed electric drive. 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM); 30 Jun-04Jul 2016; Novosibirsk: NSTU; 2016.

8. Kaluzhskii D, Makarov D, Mekhtiyev A. Title of article. Inductor Motor with Axial Excitation

Flux. 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM); 30 Jun-04 Jul 2016; Novosibirsk; NSTU; 2016.

9. Sowale A, Anthony E, Kolios A. Optimisation of a Quasi-Steady Model of a Free-Piston Stirling Engine. *Energies*. 2019;12(1). doi:10.3390/en12010072.

10. Shalai VV. Makushev YuP. Dvigatel' vneshnego sgoraniya. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2018; 1:110-114.

11. Volkov AV, Ryzhenkov AV, Parygin AG, et al. Matters Concerned with Development of Autonomous Cogeneration Energy Complexes on the Basis of Microhydropower Plants. *Thermal Engineering*. 2018;11:32-39.

12. Efendiev A.M, Nikolaev Yu.E, Evstaf'ev D.P. Vozmozhnosti energoobespecheniya fermerskikh khozyaistv na baze malykh vozobnovlyаемых istochnikov energii. *Thermal Engineering*. 2016; 2:38-45.

13. Zynovyev EA, Dovgyallo AI. A simplified method of thermoacoustic engine analysis. *Vestnik of samara university. AEROSPACE AND MECHANICAL ENGINEERING*. 2012; 3(34):206-2011.

14. Hamood A, Jaworski A.J, Mao X, et al. Design and construction of a two-stage thermoacoustic electricity generator with push-pull linear alternator. *Energy*. 2018;144:61-72.

15. Wang K, Sun D, Zhang J, et al. An acoustically matched traveling-wave thermoacoustic generator achieving 750 W electric power. *Energy*. 2016;103:313-321.

Authors of the publication

Ali D. Mekhtiyev – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

Aliya D. Al'kina – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

Vyachaslav V. Yugay – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

Ulan S. Esenzholov – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

Nurbol B. Kaliaskarov – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

Поступила в редакцию

21 октября 2020г.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ ДЛЯ ЗДАНИЙ СРЕДНИХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВАНИИ СВОЙСТВ ГЕТЕРОМОРФИЗМА ИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

С.В. Гужов

Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия
GuzhovSV@yandex.ru

Резюме: Повышение точности прогнозных величин спроса на энергетические ресурсы является актуальной задачей особенно в свете программы «Цифровая энергетика Российской Федерации». Прогнозирование требуется в том числе для систем теплоснабжения. Сложностью проведения анализа является неподтвержденность свойства подобия энергетических систем и комплексов для зданий со сходным функционалом. На примере зданий средних образовательных учреждений, расположенных на территории г. Москва, доказано предположение о гетероморфизме тепловых систем. МЕТОДЫ. В работе принято допущение об отсутствии существенных изменений данных по теплопотреблению энергохозяйств школ, что подтверждается отсутствием как изменений среднегодовых объёмов теплопотребления, так и скачков на ежемесячных графиках потребления тепловой энергии. На измеренные и переданные в информационную систему объёмы потребления тепловой энергии оказывает влияние ряд дополнительных факторов: дрейф точности приборов учёта тепловой энергии; старение и зарастание внутренних поверхностей оборудования тепловой сети здания; физическое старение и износ ограждающих конструкций здания, ухудшение характеристик их теплоизоляции и пр. При составлении прогнозного энергопотребления это означает допустимость использования не только статистических данных о самом анализируемом объекте, но и о множестве объектов, аналогичных анализируемому по структуре и функционалу. РЕЗУЛЬТАТЫ. Предложен набор входных факторов, позволяющий с достаточной точностью выполнить определение прогнозного спроса на тепловую энергию для зданий средних образовательных учреждений. Показана возможность и сходная точность результатов прогнозирования спроса на тепловую энергию как посредством использования многофакторного регрессионного анализа, так и искусственных нейронных сетей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основании комбинированного использования различных математических подходов предложено применение методики прогнозирования спроса на энергоресурсы энергетическими комплексами и системами в качестве механизма для определения корректности переданных показаний приборов учёта.

Ключевые слова: сопоставимые условия, прогнозирование, спрос на тепловую энергию, искусственная нейронная сеть, погрешность.

Благодарности: Работа выполнена по результатам проекта РНФ № 16-19-20568 «Исследование общих закономерностей и особенностей развития городских энергосистем в различных социально-экономических и природно-климатических условиях».

Для цитирования: Гужов С.В. Прогнозирование спроса на тепловую энергию для зданий средних образовательных учреждений на основании свойств гетероморфизма их энергосистем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5 С. 18-27. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-18-27.

FORECAST OF DEMAND FOR THERMAL ENERGY FOR BUILDINGS OF SECONDARY EDUCATIONAL INSTITUTIONS BASED ON THE PROPERTIES OF HETEROMORPHISM OF THEIR ENERGY SYSTEMS

SV. Guzhov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia
GuzhovSV@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Improving the accuracy of forecast calculations of demand for energy resources is an urgent task, especially in the light of the Digital Energy of the Russian Federation program. Prediction is also required for heat supply systems. The complexity of the analysis is the lack of confirmation of the similarity properties of energy systems and complexes for buildings with similar functionality. On the example of buildings of secondary educational institutions located in the territory of Moscow, the assumption of heteromorphism of thermal systems is proved. *METHODS.* In the work, an assumption was made that there were no significant changes in the data on the heat consumption of the energy facilities of schools, which was confirmed by the absence of changes in the average annual heat consumption and jumps in the monthly heat consumption diagrams. The amount of heat energy consumption measured and transferred to the IS is influenced by a number of additional factors: accuracy drift of heat energy metering devices; aging and overgrowing of the internal surfaces of the building's heating network equipment; physical aging and deterioration of the building envelope and deterioration of their thermal insulation performance. When compiling predicted energy consumption, this means that it is permissible to use not only statistical data about the analyzed object itself, but also about a variety of objects similar to those analyzed in structure and functionality. *RESULTS.* A set of input factors is proposed that makes it possible to accurately determine the predicted demand for thermal energy for buildings of secondary educational institutions. The possibility and similar accuracy of the results of forecasting the demand for thermal energy is shown both through the use of multivariate regression analysis and artificial neural networks. *CONCLUSION.* Based on the combined use of various mathematical approaches, it is proposed to use the methodology for forecasting energy demand by energy complexes and systems as a mechanism for determining the correctness of the transmitted meter readings.

Keywords: comparable conditions, forecasting, demand for thermal energy, artificial neural network, error.

Acknowledgments: The work was carried out according to the results of the RSF project No. 16-19-20568 "Study of the general laws and features of the development of urban energy systems in various socio-economic and natural-climatic conditions".

For citation: Guzhov SV. Forecast of demand for thermal energy for buildings of secondary educational institutions based on the properties of heteromorphism of their energy systems *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):18-27. doi:10.30724/1998-9903-2020-5-18-27.

Введение

Повышение качества прогнозов на спрос энергетических ресурсов предприятиями, организациями и учреждениями является актуальным направлением в свете положений, зафиксированных в программе «Цифровая энергетика Российской Федерации»¹.

Одним из ключевых положений программы является разработка и развитие цифровых сервисов и решений в части создания системы управления, координации и мониторинга государственного управления и контрольно-надзорной деятельности в различных отраслях энергохозяйства Российской Федерации. Согласно «Стратегии цифровой трансформации» Ассоциации «Цифровая энергетика» [2] разработка новых видов аналитики данных создаёт новые возможности для профилирования потребителей. К ним

¹ Программа «Цифровая энергетика Российской Федерации» [Электронный ресурс].

относится в том числе проведение анализа и прогнозирования экономии натуральных и финансовых ресурсов посредством персонализации и индивидуализации договорных отношений о поставке энергоресурсов на основе создания прогнозного профиля энергопотребления.

Задача составления прогнозного спроса на энергетические ресурсы является многоаспектной. При решении данной задачи принят ряд допущений. Поскольку энергопотребление, например, предприятиями с развитым технологическим циклом существенно зависит от объёма производимой продукции, то сложно осуществлять среднесрочное и долгосрочное прогнозирование спроса без учёта информации о действующих и предполагающихся к заключению договорных отношений на изготовление всех видов продукции. Такая информация крайне редко может быть собрана по причине наличия в ней коммерческой тайны. Кроме того, информация об объёмах ещё не заключённых договоров обладает крайне низкой надёжностью в условиях реалий экономики Российской Федерации.

Поэтому, первым допущением является факт создания прогнозной модели на основании статистических данных энергопотребления предприятия в прошлом с последующим составлением нескольких сценарных прогнозных моделей, например, для «нейтрального», «пессимистичного» и «оптимистичного» варианта развития событий.

Противоречием, ограничивающим возможности прогностических методов, является существенная диверсификация производимой продукции и оказываемых услуг предприятиями. Поскольку одно и то же оборудование может использоваться в различных технологических циклах по производству различных видов продукции, представляется крайне сложным для предприятия с развитым технологическим циклом сформулировать прогнозную модель энергопотребления для одного изделия. Данная задача ещё более усложняется, в случае, если энергоёмкость анализируемого изделия относительно невелика в рамках рассматриваемого предприятия. Для разрешения данного противоречия в настоящей статье принято допущение о рассмотрении организаций, не имеющих развитого технологического цикла. В данном исследовании рассматривается процедура составления прогнозного теплопотребления на примере энергохозяйств зданий средних образовательных школ, расположенных в г. Москва.

Информация по теплопотреблению получена на основании выгрузки данных из информационной системы (ИС) «Энергосбережение» [3] о более 160 зданий школ Москвы. Поскольку качество любого прогноза тем выше, чем выше точность и достоверность исходных для анализа данных, то из всех рассмотренных зданий произведена выборка по зданиям, теплопотребление которых отвечает следующим условиям:

- Внесение данных осуществлялось ежемесячно, строго в одни и те же дни каждого месяца;
- В статистике теплопотребления нет пропусков;

Также для соблюдения условия качества исходных данных, поставлено дополнительное условие о том, что первичный анализ данных теплопотребления методом многофакторного регрессионного анализа (МФРА) должен иметь коэффициент детерминации $R^2 > 0.90$.

Наиболее точный способ по составлению математической модели здания для расчёта прогнозного теплопотребления основан на детерминистическом подходе и состоит в составлении формульного математического аппарата, максимально полно описывающего все процессы, связанные с теплопритоками и тепловыми потерями здания. Данный подход обладает следующими недостатками: чрезвычайная трудоёмкость и длительность процесса; необходимость привлечения высококвалифицированных кадров; необходимость использования большого объёма данных о фактическом состоянии энергосистемы рассматриваемого здания, а также каждой из его ограждающих конструкций. Получение подобного объёма качественных данных требует привлечения услуг специализированной дорогостоящей лаборатории. Данные не могут быть получены силами сотрудников административно-хозяйственной службы. Используемая информационная система не содержит подобных данных. Тем более не представляется возможным выполнить полное математическое моделирование каждого здания в рамках выполнения программы «Цифровая энергетика». Всё это делает невозможным получение математической модели здания для расчёта прогнозного теплопотребления на основе детерминистического подхода. Поэтому для решения поставленной в работе задачи необходимо использовать статистический математический аппарат.

Материалы и методы

Моделирование теплопотребления энергетическими системами и комплексами (ЭСиК) методами статистической аналитики может быть выполнено с представлением

исследуемой системы в качестве «чёрного ящика». Энергетической системой будем считать совокупность конечного числа автономных и неавтономных агрегатов вместе с их взаимосвязями. В таком случае составление прогнозного математического аппарата состоит в определении взаимосвязи между набором различных входных факторов и выходным фактором, которым в рассматриваемой задаче является теплотребление объекта. Входные факторы могут быть разнообразными по функциональным признакам, но должны быть значимыми при отнесении к масштабу объекта. Высокая точность моделирования может быть достигнута посредством использования достаточно большого числа входных данных, обладающих высокой степенью точностью и достоверности. Минимальный объём статистических данных по каждому анализируемому объекту при помесечной дискретизации должен включать не менее трёх отопительных сезонов для достижения точности $\delta \geq 95\%$ и доверительной вероятности $\gamma \geq 50\%$ [4].

На измеренные и переданные в ИС объёмы потребления тепловой энергии оказывает влияние ряд дополнительных факторов, к которым относятся:

- Дрейф точности приборов учёта тепловой энергии;
- Старение и зарастание внутренних поверхностей оборудования тепловой сети здания;
- Физическое старение и износ ограждающих конструкций здания и ухудшение характеристик их теплоизоляции.

Учёт и компенсация в расчёте данных факторов представляет отдельную задачу, решение которой не рассматривается в рамках настоящей работы. При выполнении расчётов сделано допущение о несущественности изменения состояния здания и составляющих его инженерных систем за рассматриваемый период времени [5-9]. Данные о потреблении электрической энергии и водных ресурсов целесообразно использовать в качестве входных для обучения математической модели ЭСНК.

В работе принято допущение об отсутствии существенных изменений рассматриваемых тепловых систем, что косвенно подтверждается отсутствием существенных изменений среднегодовых объёмов теплотребления и отсутствием скачков на ежемесячных графиках потребления тепловой энергии.

Все принятые допущения позволяют воспользоваться наиболее подходящими для данных целей статистическими математическими аппаратами искусственных нейронных сетей (ИНС) и МФРА [10-13].

Поставленная в работе цель, состоящая в прогнозировании спроса на тепловую энергию для зданий средних образовательных учреждений, может быть решена либо индивидуально для каждого здания, либо для класса аналогичных объектов. В первом случае достижение цели будет затруднено отсутствием, частичной недоступностью и недостоверностью исходных данных, а также незначительным объёмом обучающей выборки, недостаточным для применения ИНС и для получения достоверных результатов посредством применения МФРА.

Основная сложность в расчёте «базовой линии» состоит в определении значения энергопотребления до модернизации, спрогнозированного на момент после свершения модернизации. В связи с этим корректность составления прогнозного спроса на тепловую энергию влияет не только на процесс принятия решений о модернизации, но и преимущественно на расчет энергоёмкости производимого продукта / оказываемой услуги, как составляющей цены продукции прибыли.

Активное развитие научно-технического прогресса в XX-XXI веках стимулировало развитие множества новых методов обработки статистических данных. В зависимости от типа анализируемой статистической величины, её дискретности, возможного множества принимаемых переменными значений выбираются те или иные методы обработки и анализа. Безусловно, определяющую роль в выборе подходов к анализу статистических массивов данных оказывает тип поставленной проблемы. Задачи, связанные с прогнозированием продолжением статистического ряда или рядов значений исследуемых факторов, используют при решении достаточно обширную группу методов. Процедура формирования прогнозных функций потребления энергоресурсов энергетическими системами и комплексами в силу своей специфики может использовать только некоторую часть всего разнообразия существующих подходов. Дополнительными особенностями является такие специфичности прогнозируемых величин, как: наличие диапазона возможных значений, обозначение которого доступно экспертным способом; возможность появления периодической или разовой шумовой составляющей. Существенным ограничивающим фактором при исследовании и прогнозировании поведения энергетических систем и комплексов является невозможность поставить контролируемый эксперимент. Особый вопрос состоит в определении механизма объединения различных методов с целью повышения точности и достоверности результатов прогнозирования.

Выводы о возможности снижения энергозатрат и улучшении качественных характеристик выходного продукта формируются, как правило, не в процессе проектирования энергетического комплекса, а в результате практической его эксплуатации. В таких условиях улучшение характеристик подсистем часто не представляется возможным, т.к. требует коренной переделки объекта.

При исследовании сложных систем, как правило, создавать адекватную физическую модель не представляется возможным. Для решения обычно применяют системный подход, в котором моделирование является основным методом исследования. Для большинства рабочих процессов необходимая точность прогнозирования их характеристик может быть достигнута на основе математического моделирования. Наиболее распространённым является способ прямого математического моделирования, использование которого в виду большого объёма вычислительных работ, сложности и широкой взаимосвязанности реальных процессов возможно только на базе современной высокопроизводительной вычислительной техники. Необходимая точность моделирования достигается использованием достаточно большого числа входных данных. Для достижения высокой точности и достоверности результатов необходимо использовать только вполне надежные значения исходных факторов.

Система теплоснабжения здания включает в себя одну или несколько подсистем. При этом каждая выделенная подсистема обладает рядом свойств:

- представляет собой целостный комплекс взаимосвязанных элементов, доступный к рассмотрению и анализу;
- образует единство со средой и требует учёта воздействия как системы на среду, так и среды на систему;
- является элементом системы более высокого порядка;
- при необходимости может быть разделена на ряд систем более низкого порядка.

Основными задачами формирования сводного прогнозного баланса производства и поставок энергии потребителю в т.ч. являются: удовлетворение спроса; обеспечение надежного энергоснабжения; минимизация затрат на производство и поставку электрической и тепловой энергии.

Развитие и усложнение теплоэнергетических систем и повышение эффективности городских и промышленных систем в условиях экономического уклада Российской Федерации диктует самостоятельное формирование приоритетов собственного развития. Приоритетами развития в таком случае становятся не только и не столько работоспособность и надёжность, но также и экономическая эффективность. Это существенно усложняет технико-экономические модели предприятия, имплементирует в расчёт значительное число дополнительных факторов, предъявляет новые требования к методам оптимизации. В связи с этим остро проявляется необходимость разработки методологии прогнозирования энергопотребления при определении стратегии развития систем различного масштаба без существенного загромождения воздействующих факторов. Подобная задача требует не только глубокого понимания специфики технических и технологических процессов моделируемого объекта, но и корректного применения методов математической статистики при обработке статистических данных от разноплановых и разнородных элементов.

К факторам, влияющим на объем потребления энергетических ресурсов предлагается отнести: режим функционирования; функциональное назначение энергопотребляющих установок; количество потребителей энергетических ресурсов; площадь и объем помещений; температура наружного воздуха, усреднённая за сутки; усреднённая за сутки температура наружного воздуха в отопительный период; расположение зданий по сторонам света; периоды активной эксплуатации зданий; продолжительность отопительного периода.

В случае достижения составления прогнозных моделей для класса аналогичных задач необходимо использовать свойства гетероморфизма, присущие ЭСиК [14]. Множество элементов любой ЭСиК можно представить в виде разбиения на принадлежащие данному множеству семейства и виды, для которых применимы негауссовы устойчивые распределения с бесконечной дисперсией негауссовых распределений. Поскольку функционирование реального технического и энергетического хозяйства ЭСиК в общем случае зависит от множества факторов, то допустимо представить описание эксплуатации системы как случайного процесса, функционирующего в некоторых пределах. Данное свойство приводит к увеличению разброса средней величины, по сравнению с гауссовыми законами.

Опираясь на свойства гетероморфизма, всякая энергосистема одного объекта подобна аналогичной системе другого объекта. Таким образом: прогнозная модель и спрогнозированный эффект управляющего воздействия, например, от энергосберегающего мероприятия в одной ЭСиК может быть транспонирован на все объекты аналогичного

класса. В рамках статьи проверим данное свойство на применимость к задачам формирования предиктивных правил при определении прогнозных объёмов теплотребления зданиями средних образовательных школ.

При выборе входных факторов будем руководствоваться следующими правилами:

- Данные должны быть проверяемы в открытых источниках.
- Методология сбора и обработки статистических данных, приводимых в источнике информации, не должна изменяться на протяжении всего периода, за который производится анализ.
- Данные должны содержать не менее двух независимых погодных факторов.
- Используемые статистические факторы должны иметь отношение к объёмам потребления тепловой энергии, но не обязательно должны быть определяющими.

Используемый далее набор входных данных является лишь одним из возможных. Использование иных данных, возможно, приведёт к получению более или менее точного прогноза. Входными факторами для расчёта прогнозного теплотребления с учётом перечисленных выше допущений приняты:

X1. среднемесячная температура наружного воздуха, °C;

X2. среднемесячная относительная влажность наружного воздуха (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли, %;

X3. объём потребления электрической энергии, взятый с ежемесячным интервалом, кВт·ч;

X4. объём потребления горячей воды, взятый с ежемесячным интервалом, куб.м.;

X5. объём потребления холодной воды, взятый с ежемесячным интервалом, куб.м.;

Прогнозируемым фактором (Y) является объём потребления тепловой энергии, взятый с ежемесячным интервалом, Гкал. Климатические данные получены из открытой базы данных [15]. Период обучающей выборки выбран с 01.2014г. по 12.2017г.

Результаты

На основании приведённых достаточно требовательных условий из рассмотренного массива отсеяно более 92% зданий. Таким образом, в качестве обучающей выборки используются данные об одиннадцати зданиях средних образовательных школ, 7 из которых относятся к комплексу зданий СОШ №1158 и 3 – к комплексу здания СОШ №504. Здания построены по разным проектам, имеют различную площадь и различную численность обучающихся школьников. По каждому из зданий на основании выгрузки из ИС получена информация о потреблении энергоресурсов с января 2014г. по декабрь 2017г. Обучающая выборка включает 401 значение для месяцев, относящихся к отопительным сезонам. В качестве тестовой выборки используется ещё одно здание, относящееся к комплексу СОШ №504 и отвечающее приведённым выше условиям.

Для обучения выбрана трёхслойная ИНС, по мнению автора наиболее отвечающая требованиям решаемой задачи. На вход всего подано более 2000 единиц первичной информации. Активационная функция принята сигмоидной с кривизной 2. Конфигурация ИНС: 5 входных нейронов, один выходной нейрон. Число нейронов в скрытом слое составляет 3 единицы и определено по формуле [16]:

$$k = \sqrt{m \cdot n} , \quad (1)$$

где k – число нейронов в скрытом слое, округлённое до ближайшего большего целого значения; m – число нейронов входного слоя; n – число нейронов выходного слоя.

Тип сети – персептрон, метод обучения принят *Resilient Propagation*. Количество эпох обучения – 200 ед. Обученная ИНС относительно эталонных данных имеет максимальную ошибку 34,385%, среднюю ошибку 6,181%. Для сравнения на этой же выборке данных ФМРА имеет среднюю ошибку 31,227% при $R^2 = 0,7757$, что хуже по сравнению с точностью, достигнутой посредством применения ИНС.

Обработка на обученной выборке тестового здания, показала среднюю ошибку для метода ИНС 39,0%, методом ФМРА 40,3% (рис. 1). Дальнейшее повышение точности прогноза может быть осуществлено посредством использование большего числа входных факторов, проверенных на отсутствие коллинеарности и мультиколлинеарности.

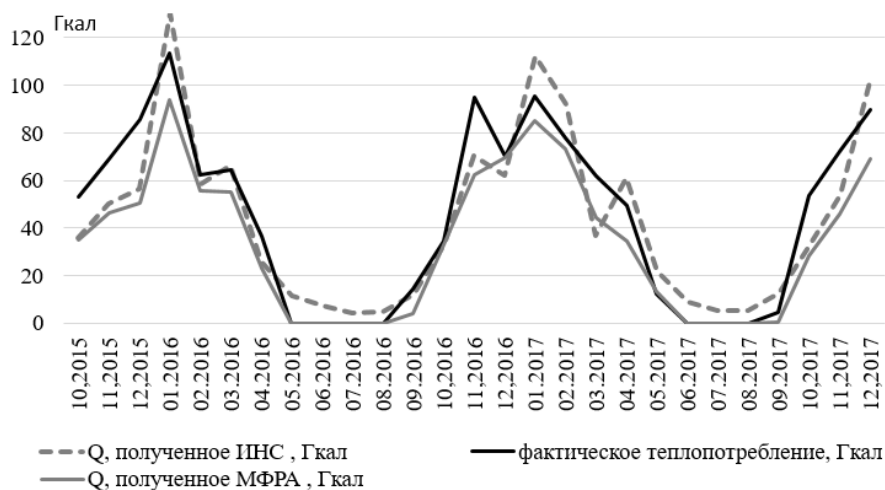


Рис. 1. Графики фактического и прогнозного теплоснабжения объектом тестовой выборки

Приведённые результаты наглядно подтверждают предположение о гетероморфизме тепловых систем на примере зданий средних образовательных учреждений. Таким образом, в рамках рассматриваемых аналогичных объектов всякая система теплоснабжения одного объекта подобна аналогичной системе теплоснабжения другого объекта.

Обсуждение

Одним из практических применений данного свойства ЭСНК может являться проверка корректности данных о потреблении энергоресурсов в различных информационных системах, например, в информационной системе энергосбережения Департамента жилищно-коммунального хозяйства города Москвы. Для проверки данного тезиса произведена обработка данных по зданию СОШ, передача показаний приборов учёта тепловой энергии в которой велась некорректно, с задержками. Поскольку на тестовой обработке модели результаты погрешности имеют близкие значения: $\Delta_{\text{МФРА}}=31,227\%$, $\Delta_{\text{ИНС}}=34,385\%$; то используем обе эти модели для определения границ определяемого интервала точности. Рассчитанная средняя ошибка метода МФРА составляет 22,425%, метода ИНС – 6,181%. Таким образом нижней границе определяемого коридора возможных значений прогнозного теплоснабжения будет являться прогнозируемое значение, полученное моделью МФРА за вычетом средней ошибки данного метода: «МФРА- $\Delta_{\text{МФРА}}$ ». Верхней границей – является прогнозируемое значение, полученное моделью ИНС, увеличенное на среднюю ошибку данного метода: «ИНС+ $\Delta_{\text{ИНС}}$ » (рис. 2).

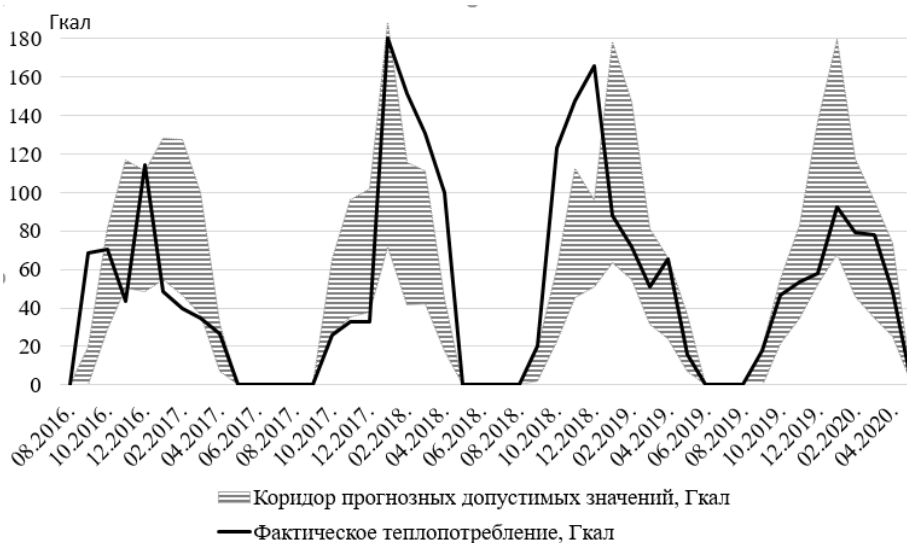


Рис. 2. Графики фактического теплоснабжения объектом тестовой выборки и коридора прогнозных значений

Исходя из приведённых результатов можно сделать предположение о том, что данные о теплоснабжении исследуемого здания СОШ вносились некорректно в феврале 2018г. и в октябре 2019г. Предположение подтверждается информацией от управляющего

персонала школы. В октябре 2019г. данные внесены более корректно, т.к. линия внесённых показаний проходит по верхней границе коридора прогнозных значений.

Заключение или Выводы

Следует отметить, что использованный в анализе набор факторов X1–X5 не является единственным. Задача выявления наилучшего набора факторов, дающих при прогнозировании наиболее точный результат, является самостоятельной, объёмной и не ставилась в рамках данной работы. Результаты данной обработки могут быть использованы, например, в контуре энергоменеджмента при принятии решений по эффективности работы как хозяйственного, так и управленческого персонала.

Показанная точность прогнозирования достигнута при использовании ежемесячной дискретизации исходных данных. Входные данные можно подразделить на две основных группы: показания приборов учёта на предприятии и данные, полученные из открытых источников. Измеряемые на объекте данные обладают, как правило, низкой дискретизацией; поэтому остальные данные перед применением намеренно закругляются, и объём генеральной совокупности составляет 401 строки. В случае если использовать всю полноту открытых данных и обеспечить ежечасный автоматизированный опрос приборов учёта, то объём генеральной совокупности от 401 строки возрастёт до 288720 строк. При подобном увеличении объёма наблюдений ожидается существенное повышение точности моделей на основе ИНС, по сравнению с моделями, использующими МФРА. Тем не менее, при малых выборках метод МФРА имеет преимущество по сравнению с ИНС. Для объектов уровня «здание» существенную роль играют:

a. фактор соблюдения периодичности показаний. Повышение качества исходных замеров может быть достигнуто только при переходе к автоматизированным дистанционным системам опроса приборов учёта;

b. число анализируемых наблюдений, для которых повышение точности можно достигнуть двумя способами:

b1. посредством накопления большей глубины архива с существующей дискретизацией по шкале времени (например, ежемесячные). Это не удобно, т.к., во-первых, прогноз необходимо выполнить в текущий момент времени, а не через 2-3 года. Во-вторых, велик риск модернизации части ЭСМК и существенного изменения базовой линии, что приведёт к невозможности использования накопленного объёма статистических данных.

b2. произвести увеличение объёма архива данных посредством перехода к более частому опросу приборов учёта (например, от ежемесячных к ежесуточному). Необходимо отметить, что значение математически обоснованного ранее аргумента t , которому соответствует значение функции Лапласа, должно равняться 2.58, что соответствует не менее 364 наблюдениям в год. Таким образом, переход к опросу и накоплению в базе данных приборов учёта энергоресурсов, например, с ежечасной дискретизацией, является в некоторой мере избыточным при условии накопления не более 3 лет наблюдений за ЭСМК. Этот факт также облегчает группу задач, связанных со сбором достоверных данных о климатических и погодных факторах, т.к. открытые и надёжные интернет ресурсы предоставляют информацию об изменении климатических данных с ежесуточной дискретизацией. При этом, нужно помнить, что даже при переходе к посуточным наблюдениям, желательное число периодов наблюдений (например, отопительных сезонов) должно быть не меньше трёх для достижения значения доверительной вероятности $\gamma = 0,99$ и точности прогнозной модели $\delta = 0,95\%$.

c. точность исходных данных и число знаков после запятой на счётчике отражаются на точности прогноза несущественно. Нет необходимости повышать размерность показаний приборов учёта.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Подтверждено свойство гетероморфизма систем теплоснабжения на примере зданий средних образовательных учреждений. Показано, что незначительность объёма выборки для анализируемого объекта может быть компенсирована посредством использования данных от аналогичных по функционалу объектов.

2. На примере прогнозирования спроса на тепловую энергию для зданий средних образовательных учреждений показано, что достаточно эффективными может быть, как использование многофакторного регрессионного анализа, так и искусственных нейронных сетей.

3. Предложен набор входных факторов, позволяющий с достаточной точностью выполнить определение прогнозного спроса на тепловую энергию для зданий средних образовательных учреждений.

4. Показано применение методики прогнозирования спроса на энергоресурсы энергетическими комплексами и системами в качестве механизма для определения корректности переданных показаний приборов учёта.

Литература

1. Стратегия цифровой трансформации в электроэнергетике [Электронный ресурс]. Доступно по: URL: <https://www.digital-energy.ru/activity/materials/strategy-for-digital-transformation-electric-power-industry/>. Ссылка активна на: 20 мая 2020.
2. Информационная система энергосбережения Департамента жилищно-коммунального хозяйства города Москвы. Доступно по: [Электронный ресурс]. URL: <https://ise.mos.ru/>. Ссылка активна на: 20 мая 2020.
3. Гужов С.В. Исследование и прогнозирование качества функционирования энергосистем зданий для занятий водными видами спорта при разнообразных внешних воздействиях. Вестник МЭИ. 2016 № 5. С. 88-93
4. Кошарная Ю.В. Методика анализа параметров электропотребления для нормирования и оценки энергосбережения при проведении энергоаудита предприятий и организаций // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 4. С. 56-69.
5. Воевода А.Е., Харитонов Д.Д., Валь П.В. Краткосрочное прогнозирование электропотребления на основе метода случайного леса // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016 Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3 т.. 2016. С. 124-127.
6. Dong Q., Xing K., Zhang H. Artificial neural network for assessment of energy consumption and cost for cross laminated timber office building in severe cold regions // Sustainability. 2017. .V. 10. № 1. P. 84.
7. Firsova I.A., Vasbieva D.G., Kosarenko N.N., et al. Energy consumption forecasting for power supply companies // International Journal of Energy Economics and Policy. 2019. V. 9. № 1. pp. 1-6.
8. Popov V., Fedosenko M., Tkachenko V., et al. Forecasting consumption of electrical energy using time series comprised of uncertain data // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2019 - Proceedings 6. 2019. pp. 201-204.
9. Lemke F. Probabilistic energy forecasting based on self-organizing inductive modeling // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 871. pp. 405-420.
10. Wang J., Zeng N., Zhou B., et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms // Jisuanji Yanjiu yu Fazhan. 2019. V. 56. № 8. pp. 1587-1603.
11. Jiang P., Dong J., Huang H. Forecasting china's renewable energy terminal power consumption based on empirical mode decomposition and an improved extreme learning machine optimized by a bacterial foraging algorithm // Energies. 2019. V. 12. № 7. P. 1331.
12. Runge J., Zmeureanu R. Forecasting energy use in buildings using artificial neural networks: a review // Energies. 2019. V. 12. № 17. P. 3254.
13. Кудрин Б.И. Организация, построение и управление энергетическим хозяйством металлургических предприятий. Дисс. ... доктора технических наук. Гос. союзный ин-т по проектированию металлургических заводов (ГИПРОМЕЗ) . 1979. 282 с.
14. rp5.ru Расписание погоды. Доступно по: <https://rp5.ru/>. Ссылка активна на 21 мая 2020.
15. Зарубин О.А. Применение нейронных сетей для целей анализа данных дистанционного зондирования Земли // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 8. Доступно по: [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/08/70887>. Ссылка активна на: 20 мая 2020.

Авторы публикации

Гужов Сергей Вадимович – канд. техн. наук, доцент, директор Центра подготовки и профессиональной переподготовки "Энергоменеджмент и энергосберегающие технологии" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

References

1. *Strategiya tsifrovoy transformatsii v elektroenergetike*. [Elektronnyy resurs]. Available at: URL: <https://www.digital-energy.ru/activity/materials/strategy-for-digital-transformation-electric-power-industry/> Accessed to: May 20, 2020.
2. *Informatsionnaya sistema energosberezheniya Departamenta zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva goroda Moskvy* [Elektronnyy resurs]. Available at: URL: <https://ise.mos.ru/> (data Accessed to: May 20, 2020.

3. Guzhov SV. Issledovaniye i prognozirovaniye kachestva funktsionirovaniya energosistem zdaniy dlya zanyatiy vodnymi vidami sporta pri raznoobraznykh vneshnikh vozdeystviyakh. *Vestnik MEI*. 2016;5: 88-93.
4. Kosharnaya Yu.V. Metodika analiza parametrov elektropotrebleniya dlya normirovaniya i otsenki energosberezheniya pri provedenii energoaudita predpriyatii i organizatsii. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. 2016;4:56-69.
5. Voevoda AE, Kharitonova DD, Val' PV. Kratkosrochnoe prognozirovanie elektropotrebleniya na osnove metoda sluchainogo lesa. *Elektroenergetika glazami molodezhi - 2016 Materialy 7 Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2016. pp. 124-127.
6. Dong Q, Xing K, Zhang H. Artificial neural network for assessment of energy consumption and cost for cross laminated timber office building in severe cold regions. *Sustainability*. 2017;10(1):84.
7. Firsova IA, Vasbieva DG, Kosarenko NN, et al. Energy consumption forecasting for power supply companies. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019;9(1):1-6.
8. Popov V, Fedosenko M, Tkachenko V, et al. Forecasting consumption of electrical energy using time series comprised of uncertain data. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2019 - Proceedings* 6. 2019. pp. 201-204.
9. Lemke F. Probabilistic energy forecasting based on self-organizing inductive modeling. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019;871:405-420.
10. Wang J, Zeng N, Zhou B, et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms. *Jisuanji Yanjiu yu Fazhan*. 2019;56(8):1587-1603.
11. Jiang P, Dong J, Huang H. Forecasting china's renewable energy terminal power consumption based on empirical mode decomposition and an improved extreme learning machine optimized by a bacterial foraging algorithm. *Energies*. 2019;12(7):1331.
12. Runge J, Zmeureanu R. Forecasting energy use in buildings using artificial neural networks: a review. *Energies*. 2019;12(17):3254.
13. Kudrin BI. *Organizatsiya, postroyeniye i upravleniye energeticheskim khozyaystvom metallurgicheskikh predpriyatii*: Diss. ... doktora tekhnicheskikh nauk. Gos. soyuznyy in-t po proyektirovaniyu metallurgicheskikh zavodov (GIPROMEZ). 1979. 282 s.
14. rp5.ru Raspisaniye pogody. Available at: [elektronnyy resurs: https://rp5.ru/](https://rp5.ru/) Accessed to: May 20, 2020.
15. Zarubin O.A. Primeneniye neyronnykh setey dlya tseley analiza dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii*. 2016. N 8. Available at: URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/08/70887>. Accessed to: May 20, 2020.

Authors of the publication

Sergey V. Guzhov – National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia. E-mail:GuzhovSV@yandex.ru.

Поступила в редакцию

15 октября 2020г.



МЕТОД ВСТРОЕННЫХ РЕШЕНИЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Л.Э. Меламед

Акционерное общество «Интеллект», г. Москва, Россия

lev.melamed@yandex.ru

РЕЗЮМЕ: *ЦЕЛЬ.* Цель работы – нахождение метода математического моделирования и анализа неоднородных физических полей и влияния внутренних структур на эти поля. Ищутся решения в областях, в которых существуют подобласти с уже известным поведением («встроенные» области и встроенные решения). Целью является нахождение метода моделирования, не требующего изменения уже существующих программных средств и связанного только с модификацией правых частей рассматриваемых уравнений. *МЕТОД.* Предлагаемый метод математического моделирования характеризуется использованием характеристических функций для задания геометрического расположения и формы встроенных областей, для задания систем встроенных областей (например, шарообразных засыпок или турбулентных вихрей) без задания их как геометрических объектов, для модификации расчетного дифференциального уравнения в пределах встроенных областей. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Сформулирована и доказана (в виде утверждения) теорема, формализующая суть предлагаемого метода и дающая алгоритм его применения. Этот алгоритм состоит в а) представлении дифференциального уравнения задачи в другой аналитической форме; в этой форме к исходному дифференциальному уравнению (к его правой части) добавлен член, при наличии которого это уравнение дает заранее заданное («встроенное») решение в необходимых областях и б) представлении искомого решения (с помощью характеристической функции) в виде, в котором это решение имеет вид либо искомой функции (в основной области), либо заданных функций (во встроенных областях). Представлены примеры расчетов из двух физико-технических областей – теплопроводности и гидродинамики. Результатом работы является также расчет турбулентного течения в трубе, в которой задана система шаровых вихрей, скорости и направления вращения этих вихрей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложенный метод позволяет моделировать сложные физические процессы, в том числе турбулентность, апробирован, достаточно прост и незаменим в случаях, когда встроенные структуры могут быть заданы только программным образом.

Ключевые слова: турбулентность, моделирование, вихревые структуры, встроенные области.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ, проект № 18-08-00051а).

Для цитирования: Меламед Л.Э. Метод встроенных решений в моделировании турбулентности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 28-40. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-28-40.

BUILT-IN TURBULENCE MODELLING SOLUTION METHOD

LE. Melamed

Joint-stock company " Intelligence ", 117246 г. Moscow, Russian Federation

lev.melamed@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The aim of the work is to find a method for mathematical modeling and analysis of inhomogeneous physical fields and the influence of internal structures on these fields. Solutions are sought in areas in which there are subdomains with already known behavior ("embedded" areas and embedded solutions). The goal is to find a modeling method that does not require a change in existing software and is associated only with the modification of the right-hand sides of the equations under consideration. *METHODS.* The proposed method of mathematical modeling is characterized by the use of characteristic functions for specifying the

geometric location and shape of embedded areas, for specifying systems of embedded areas (for example, spherical fillings or turbulent vortices) without specifying them as geometric objects, for modifying the calculated differential equation within the embedded areas. **RESULTS.** A theorem is formulated and proved (in the form of a statement) that formalizes the essence of the proposed method and gives an algorithm for its application. This algorithm consists in a) representation of the differential equation of the problem in another analytical form; in this form, a term is added to the original differential equation (to its right-hand side), in the presence of which this equation gives a predetermined ("built-in") solution in the necessary regions and b) a representation of the desired solution (using the characteristic function) in the form in which this solution takes the form of either the desired function (in the main area) or the specified functions (in the embedded areas). Examples of calculations from two physical and technical areas - thermal conductivity and hydrodynamics are presented. The result of the work is also the calculation of a turbulent flow in a pipe, in which a system of ball vortices, the speed and direction of rotation of these vortices are specified. **CONCLUSION.** The proposed method makes it possible to simulate complex physical processes, including turbulence, has been tested, is quite simple and indispensable in cases where embedded structures can be specified only by software.

Keywords: turbulence, modeling, vortex structures, embedded areas.

Acknowledgments: This work is fulfilled with financial support of the Russian fund of basic researches (RFFI, the project № 18-08-00051a).

For citation: Melamed LE. Built-in turbulence modelling solution method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):28-40. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-28-40.

Введение

Во всех областях энергетики, традиционной и инновационной, во всех ее процессах и аппаратах основным режимом движения жидкостей и газов является турбулентный. Такой же режим движения присутствует в огромном числе явлений природы, отраслей науки и техники. Изучение этого режима в сфере энергетики вызывается отнюдь не только интересами чистой науки, но и, в большой степени, вопросами экономики. Гипотетическая возможность хотя бы частичного «обуздания» турбулентности – в отношении уменьшения гидродинамического сопротивления, т.е. турбулентных потерь и затрат на прокачку потоков – сулит огромные экономические выгоды. Но трудности изучения этого явления таковы, что даже наступление с самых разных сторон не привело пока к решающему продвижению в этой области. Одной из таких сторон является компьютерное моделирование процесса. Именно этой задаче посвящена данная работа.

Литературный обзор

Теме моделирования турбулентности посвящено огромное число работ и обзоров (см. например, [1,2]. Однако, если под моделированием понимать не только расчет уравнения или системы уравнений, с той или иной степенью достоверности описывающих процесс, но и воспроизведение физической картины процесса, то это число существенно уменьшается. Еще меньшее число работ посвящено тому, как воспроизвести детальную картину процесса с возможностью достаточно простого варьирования размеров и форм ее характерных составляющих, турбулентных структур – вихрей, вихревых колец, их кластеров, фрактальных структур. Данная работа посвящена именно такому моделированию. Это моделирование, кроме расчетных результатов, может иметь и прямое практическое значение. Так, оно может привести к нахождению и объяснению способов уменьшения гидродинамического сопротивления турбулентных структур жидкости введением различных добавок.

Необходимость введения в рассмотрение конкретных структур создает существенные трудности. Дело в том, что в современном стандартном компьютерном моделировании геометрический вид области моделирования (и ее внутренних подобластей, если они есть), задается, как правило, вручную, складывается из набора некоторых «примитивов» – линий, прямоугольников, параллелепипедов, окружностей, шаров, цилиндров, конусов. Имеется и возможность «размножения» этих объектов. Но в турбулентности, кроме относительно простых структур, таких, как шаровые вихри и вихревые кольца, участвуют фрактальные структуры каскадного типа, которые невозможно «нарисовать» вручную и, тем более, перерисовывать от расчета к расчету. Такие структуры и их видоизменения можно задавать только программным образом. При этом упор делается не на внешние границы расчетной области, которые, как правило, достаточно просты, а на внутренние структуры, для которых

надо задать не только их форму и размеры, но и их поведение (скорость, поступательную и/или вращательную, температуру, мощность источника и т.п.). Основы именно такого, программного метода формирования исходных данных для моделирования, причем не только для гидродинамических задач, но и для других областей техники, предлагаются в данной работе. В качестве примера из другой области представлено решение задачи теплопроводности.

Данная работа является продолжением ряда работ, посвященных расчету турбулентных течений как течений с внутренними сопротивлениями, полностью распределенными [3] или сосредоточенно-распределенными («вихревая засыпка») [4,5]. В них были разработаны и применены методы, позволяющие решать широкий класс задач. К таким методам относится метод локальных флуктуаций [4], позволяющий моделировать турбулентность и другие неоднородные среды [5] с помощью локального изменения их физических свойств. В отличие от этого излагаемый далее метод встраивания локально-заданных решений позволяет моделировать турбулентные течения и другие среды с локально-различным поведением, не меняя, даже локально, их физические свойства. Он позволяет выделить область или систему внутренних областей, которые требуются для выбранной модели, задать их геометрию и решения в них. Оказалось, что для этих целей чрезвычайно полезно понятие характеристической функции, примененной к пространству и позволяющей выделить из пространственной области ее часть или систему частей. В работах [2,3] такие функции использовались для заданной модификации физических свойств некоторых областей среды. В данной работе характеристические функции применены для конструирования решаемого уравнения и искомого решения с тем, чтобы в разных областях расчетного поля они имели разный вид.

Сфера применения метода достаточно велика. При моделировании турбулентности можно задать систему вихрей или иных структур, вращающихся с заданными окружными скоростями в заданных направлениях и при этом движущихся с заданной скоростью. Задавая возможные варианты распределения положений, размеров вихрей и их окружных скоростей, можно не только находить поля скоростей, в частности – в окрестностях этих структур, но и рассчитывать поля давления. С помощью задания нулевой скорости в некоторых подобластях можно решать задачи обтекания неподвижных тел и их комбинаций (например, шаровых засыпок [6], что необходимо для расчетов тепловыделяющих сборок из микротвэлов в инновационной атомной энергетике. При теоретической оценке основных констант турбулентности будет возможен и полезен дополнительный анализ трансформации вихревых диполей [7]. Метод впрямую применим к ведущейся в настоящее время большой группе работ: по исследованию связи изменений формы вихревых диполей с движением несущего их потока [8], изучению динамики ламинарно-мелких вихревых диполей [9], анализу структуры и взаимодействия струй и подповерхностных вихрей [10] и к другим задачам, связанным с конкретными формами вихревых структур.

Теория метода

Рассмотрим постановку, формализацию и метод решения таких задач, которые можно назвать задачами с локально-вложенными решениями. Эти решения или, точнее, поведение среды являются заданными в локальных внутренних или приграничных частях пространственной расчетной области. Результатом должно быть решение задачи для всей расчетной области, с автоматическим «сшиванием» решений для всех подобластей и получением непрерывного решения-результата.

Пусть нам известно решение (например, программное) некоторой задачи А для уравнения $L(u)=F$ (назовем его основным) в области Ω с краевым условием $l(u)=S$. Рассмотрим задачу В, которая отличается от А только тем, что внутри области Ω (возможно, с выходом на ее границу) выделена некоторая подобласть Ω_1 , на которой вместо искомого решения u задана функция f , удовлетворяющая основному уравнению. Требуется на основе решения задачи А получить (в виде непрерывной функции) решение задачи В, выполнив следующие условия: использовать программу решения задачи А, не задавать область Ω_1 геометрически на расчетном поле и не задавать условий на её границе $\partial\Omega_1$. Иными словами, решение задачи В должно удовлетворять основному уравнению в области $\Omega \setminus \Omega_1$ (Ω без Ω_1) и условию $u=f$ в подобласти Ω_1 , включая ее границу, причем эти части решения должны сопрягаться между собой по общей части границ этих областей.

Представим искомое решение в виде

$$v=u(1-\theta)+f\theta$$

и выпишем следующее операторное уравнение

$$L(u)(1-\theta)+L(v)\theta=F.$$

Здесь θ – характеристическая функция области Ω_1 , равная единице внутри и на границе этой области и нулю вне ее. Эти соотношения являются основой следующего утверждения.

Пусть требуется решить задачу А, состоящую из двух частей:

$$a) \text{ уравнения } L(u)=F, \quad x \in \Omega \quad (1)$$

$$\text{с краевым условием } l(u)=S, \quad x \in \partial\Omega \quad (2)$$

в заданной области Ω , и

$$b) \text{ условия } u=f(x), \quad x \in \bar{\Omega}_1, \quad (3)$$

где $\Omega_1 \subset \Omega$ – некоторая область, находящаяся внутри (или частично выходящая на границу) области Ω , $\bar{\Omega}_1$ – ее замыкание, а f – заданная функция, удовлетворяющая уравнению

$$L(f)=F \quad (4)$$

Рассмотрим другую задачу – задачу В, отличающуюся от А в двух отношениях: во-первых, в ней отсутствует условие b) задачи А и, во-вторых, уравнение (1) имеет вид

$$L(u)=F+G, \quad (5)$$

$$\text{где } G=[L(u)-L(v)]\theta, \quad (6)$$

$$v=u(1-\theta)+f\theta, \quad (7)$$

а функция θ является характеристической функцией замкнутой области Ω_1 . Утверждается, что при этих условиях решение задачи В, заданной на той же области Ω , с тем же условием (2), является решением задачи А.

Доказательство этого утверждения таково. Рассмотрим значения $\theta=1$ и $\theta=0$. При $\theta=1$ (т.е. в области Ω_1 и на её границе $\partial\Omega_1$) из (5,6) имеем

$$L(v)=F. \quad (8)$$

Решение этого уравнения при $\theta=1$ есть $u=f$. Действительно, при подстановке $u=f$ в (7) и затем результата (при $\theta=1$) в (8) получаем выполняемое по заданному условию тождество (4). При $\theta=0$ (т.е. в области $\Omega \setminus \Omega_1$) имеем уравнение (1) с выполненным на границе $\partial\Omega_1$ условием (3). Таким образом, задача В содержит все уравнения и условия задачи А. Утверждение доказано.

Рассмотрим некоторые частные случаи и дополнения.

1. Когда оператор L – линейный, имеем

$$G = [L(u - v)]\theta = L[(u - f)\theta] \quad (9)$$

(повторного применения функции θ не требуется).

2. Когда оператор L состоит из двух частей, т.е. уравнение имеет вид

$$L_1(u) = L_2(u) + F \quad (10)$$

(в частности, в гидродинамических уравнениях движения), модификация уравнения такова: $L_1(u) = L_2(u) + G + F$, где $G=[L_1(u) - L_1(v) - (L_2(u) - L_2(v))]\theta$,

и при $\theta=0$ имеем (10), а при $\theta=1$ получаем $L_1(f)=L_2(f)+F$ (условие, равносильное условию (4)).

3. При задании двух и более встраиваемых областей и функций на них выражения (6,7) становятся такими

$$G = \sum_i [L(u) - L(v_i)]\theta_i, \quad v_i = u(1 - \sum_i \theta_i) + \sum_i f_i \theta_i \quad (11)$$

Доказательства справедливости этого утверждения не потребуются, если заметить, что для каждой области i (внутри и на ее границе), где $\theta_i=1$, все остальные множители θ_i равны нулю и поэтому все остальные слагаемые отсутствуют, и задача возвращается к исходной постановке с одной встраиваемой областью, которая рассмотрена выше.

Итак, задание суммы в выражениях (11) позволяет осуществить встраивание нескольких областей сразу и получить общий результат, включающий все функции f_i , при однократном решении задачи. Сложение здесь имеет не арифметический, а алгоритмический смысл, позволяющий объединить в одну задачу условия, относящиеся к разным, непересекающимся пространственным областям.

4. Необходимо отметить, что величины G в физических задачах имеют четкий физический смысл. Это именно те воздействия, которые создают и поддерживают во встраиваемых областях задаваемые там профили соответствующих физических величин.

Замечания

1. Реализация предлагаемой методики особенно проста при возможности задания функций F и θ в компьютерной программе в аналитической форме, с использованием всех

переменных. Такими возможностями обладают, в частности, системы *Matlab* и *Comsol Multiphysics*. На основе последней выполнены приведенные ниже примеры.

2. Если для заданной функции f уравнение (3) не выполняется, то решение внутри подобласти Ω_1 будет неправильным, но условия на ее границе все равно будут выполнены, и решение для области $\Omega \setminus \Omega_1$ будет правильным.

3. Стоит отметить, что из разности операторов $L(v) - L(u)$ автоматически «исчезают», взаимно сокращаются члены этих операторов, не подвергающиеся изменениям в данной конкретной задаче. Поэтому эти операторы могут сразу иметь усеченный вид. В них должны присутствовать только слагаемые, содержащие присутствующие в функциях f зависимые переменные. Так, в гидродинамических задачах при задании f как скорости в G не участвует градиент давления и, наоборот, при задании f как градиента давления в G не будут фигурировать скорости.

Примеры

Приведем примеры применения метода.

1. Чтобы показать, что метод обладает большой общностью и пригоден не только для задач гидродинамики, которым посвящена вся последующая часть статьи, рассмотрим задачу теплопроводности. Требуется рассчитать плоское стационарное температурное поле $u(x, y)$ в квадратной области $\Omega = \{-0.8 < x, y < 0.8\}$ с двумя встроенными подобластями - кругом и прямоугольником. В круге Ω_1 радиуса $R=0.2$ с центром в точке $x_0=-0.3$, $y_0=0.4$ (в левом нижнем углу области) поддерживается заданный профиль температуры $f_1(x, y) = 70 + 40y$. В правом верхнем углу расчетного поля задана прямоугольная область Ω_2 ($a_1 \leq x \leq a_2$, $b_1 \leq y \leq b_2$) с заданной постоянной температурой $f_2=40$ (размерности приводимых величин несущественны). Заданы граничные условия: на горизонтальных сторонах квадрата - постоянные температуры ($u=100$ внизу, $u=0$ сверху), вертикальные стороны теплоизолированы. Вне заданных областей Ω_1 и Ω_2 температурное поле неизвестно и должно быть рассчитано.

Рассмотрим решение этой задачи в компьютерной системе *Comsol*. Расчетная область (квадрат) впрямую рисуется в графическом окне, однако заданные области Ω_1 и Ω_2 вообще не рисуются. Область Ω_1 (круг) зададим характеристической функцией $\theta_1(x, y) = \eta(r) - \eta(r - R)$, где η – единичная функция Хевисайда и $r^2 = x^2 + y^2$. Область Ω_2 (прямоугольник) задается функцией $\theta_2 = [\eta(x - a_1) - \eta(x - a_2)][\eta(y - b_1) - \eta(y - b_2)]$, где (a_1, b_1) , (a_2, b_2) – координаты вершин прямоугольника.

С учетом линейности оператора Лапласа $L = \partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2$ и в соответствии с формулами (9) и (13) получаем модифицированную задачу $L(u) = G$, где $G = L[(u - f_1)\theta_1 + (u - f_2)\theta_2]$ – модифицированная правая часть, заданная аналитически с помощью заданных функций f_1 и f_2 , сконструированных нами характеристических функций θ_1 и θ_2 и имеющихся в системе *Comsol* функций (частных производных от искомых переменных).

Результаты решения задачи представлены на рис.1. Поскольку области Ω_1 и Ω_2 геометрически никак не заданы, их контуры можно увидеть только по картине изотерм, представленной на рис.1а. Наличие и правильность воспроизведения заданных функций f_1 и f_2 отражают сечения температурного поля на рис.1б – вертикальное сечение через центр круга (при $x=0.4$, снизу вверх, сплошная линия) и горизонтальное через центр прямоугольника (при $y=0.5$, справа налево, штриховая линия). Этот пример представлен очень кратко, поскольку подробности метода будут представлены в дальнейших примерах.

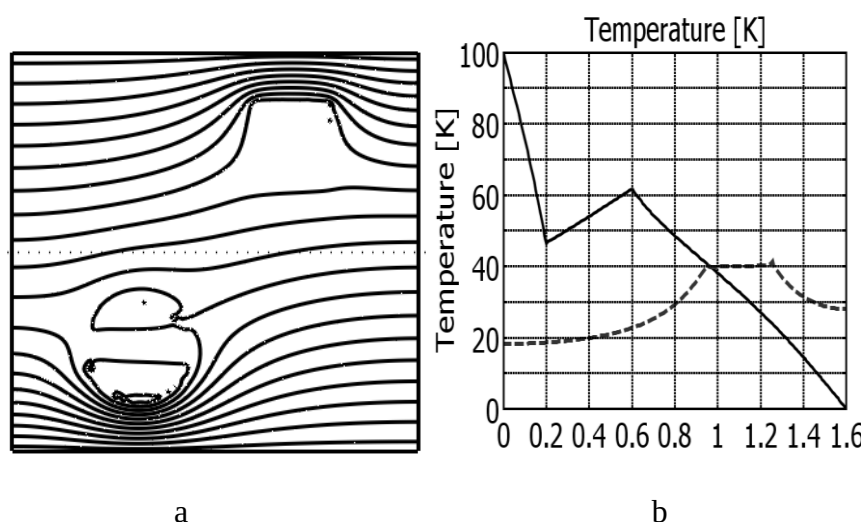


Рис.1 Температурное поле квадратной области с заданными температурами во встроенных областях – круглой и прямоугольной; а) изотермы, б) температуры: по вертикальному среднему сечению круга (снизу вверх, сплошная линия) и по горизонтальному среднему сечению прямоугольника (справа налево, пунктирная линия).

2. Перейдем теперь к гидродинамическим задачам – от простых к сложным. Сначала рассмотрим задачу поиска поля скоростей вблизи гипотетической турбулентной структуры, представляющей собой два шаровых вихря, расположенных рядом, но вращающихся в разные стороны. Постановка задачи такова. Через участок трубы радиусом 0,6 м и длиной 1,4 м течет жидкость с ламинарным профилем осевой скорости v на входе (средняя скорость равна 2 м/сек) и условиями прилипания на стенках. На оси трубы, достаточно далеко от входа, вращается с окружной скоростью $f_1 = cr$ ($c = 50$ 1/сек) круглый вихрь радиуса $R = 0,2$ м. Второй такой же вихрь, но вращающийся в противоположную сторону ($f_2 = -cr$), расположен на оси выше и почти касается первого (рис.2). Такая схема отличается от реального диполя (см. например, [11]), сохраняя сходство только вращением объемов в разные стороны. Требуется рассчитать поле скоростей и давления во всей расчетной области.

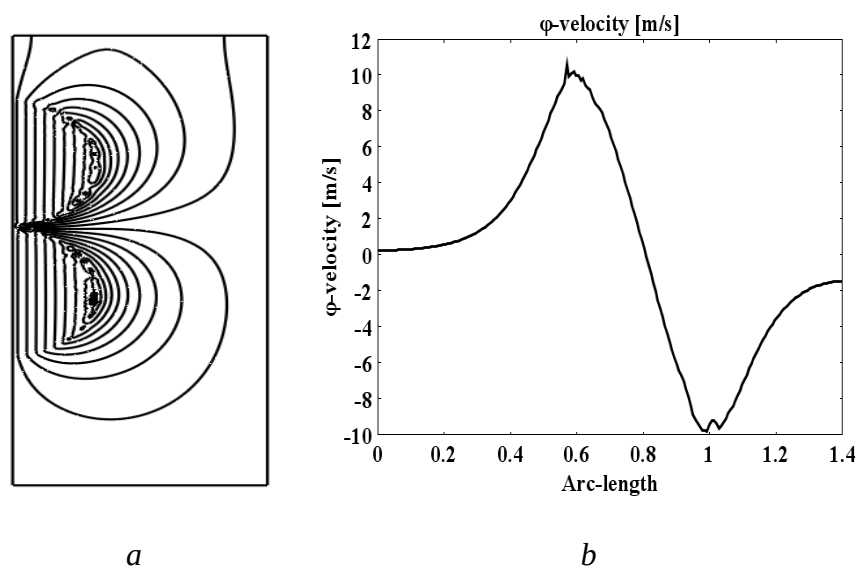


Рис. 2. Два жидких шара, вращающиеся в противоположные стороны вокруг вертикальной оси, а – линии равных окружных скоростей, б – профиль окружной скорости в вертикальном сечении через вершины шаров.

Задача описывается следующей системой уравнений движения в цилиндрической осесимметричной системе координат [12]:

$$\begin{aligned}
\rho(uu'_r + vv'_z - \frac{1}{r}w^2) &= -p'_r + \eta(u''_{rr} + u''_{zz} + \frac{1}{r}u'_r - \frac{1}{r^2}u) + F_r \\
\rho(uv'_r + vv'_z) &= -p'_z + \eta(v''_{rr} + v''_{zz} + \frac{1}{r}v'_r) + F_z \\
\rho(uw'_r + vw'_z + \frac{1}{r}uw) &= -p'_\varphi + \eta(w''_{rr} + w''_{zz} + \frac{1}{r}w'_r - \frac{1}{r^2}w) + F_\varphi
\end{aligned} \tag{12}$$

Скорость u направлена по радиусу r , скорость v – по оси симметрии z , окружная скорость w (вокруг оси z) не зависит от угла поворота φ . Искомая функция G состоит теперь из трех компонент – G_r, G_z, G_φ .

Характеристические функции шаров зададим тем же образом, как и круг выше, а именно: $\theta_i(r, z) = \eta(t_i) - \eta(t_i - R)$, где η – единичная функция Хевисайда и

$t_i = \sqrt{(r - r_i)^2 + (z - z_i)^2}$; r_i, z_i – координаты центров шаровых вихрей. Искомая окружная скорость (w с тильдой, см. ниже) соответствует второму из выражений (11).

Выделяя члены, в которые входит окружная скорость, уравнения системы (12) в сгруппированном виде можно представить так:

$$\begin{aligned}
L_{1ar}(u, v) + L_{1br}(w) &= L_{2r}(u, v) + F_r \\
L_{1z}(u, v) &= L_{2z}(u, v) + F_z \\
L_{1\varphi}(w) &= L_{2\varphi}(w) + F_\varphi
\end{aligned}$$

В первом уравнении (по r) таким членом является $L_{1br}(w) = -(\rho / r)w^2$, в третьем (по φ) – почти все его слагаемые.

Рассмотрим первое уравнение. Функция G_r равна

$$G_r = -L_{1br}(\tilde{w}) + L_{1br}(w) = (\rho / r)(f^2 - w^2)\theta$$

Функция G_z равна нулю, т.к. в этом уравнении (по z) изменений не происходит.

Обратимся к третьему уравнению системы. Оно имеет вид (9). Поскольку все его члены линейны по w , то функция G_φ зависит от разностей $(f_i - w)\theta_i$ и равна

$$G_\varphi = \sum L_{2\varphi}((f_i - w)\theta_i) - \sum L_{1\varphi}((f_i - w)\theta_i)$$

(общий множитель θ опущен, его действие заменяют «внутренние» функции θ). Итак, к правой части системы $F = \{F_r, F_z, F_\varphi\}$ почленно добавляется функция $G = \{G_r, 0, G_\varphi\}$.

На рис.2 представлены некоторые результаты расчета. На рис.2а представлено осевое сечение вертикально расположенной трубы. Левая грань прямоугольника – ось трубы, нижняя – входное сечение. Представлены контуры одинаковых окружных скоростей, дающие представление о расположении и размерах шаровых вихрей, поскольку геометрически они никак не отображаются. На рис.2b дано поле окружных скоростей w в вертикальном сечении через вершины вихрей. Видно, что на поверхностях вихрей скорость $w = cR = 10$ м/сек и $w = -cR = -10$ м/сек (т.е. в противоположных направлениях).

3. Рассмотрим некоторые элементы предлагаемой методики на следующем примере, суть которого иллюстрируется рисунками 3а и 3 б. В трубе снизу вверх течет жидкость, скорость которой на входе имеет ламинарный профиль. На стенке, как обычно, условия прилипания. В трубе выделены две структуры, часто наблюдающиеся в турбулентных потоках – шаровой вихрь и вихревое кольцо. Объемы жидкости, охватываемые этими структурами, «остановлены» с помощью задания функции (см. формулу (3)) равной нулю. Таким образом, задано, что внутри и на границах этих объемов (описываемых своими характеристическими функциями θ_1 и θ_2) скорости $u=v=0$. Эти функции (и описываемые ими объемы) представлены на рис 4. Линии тока данного течения представлены на рис. 4б.

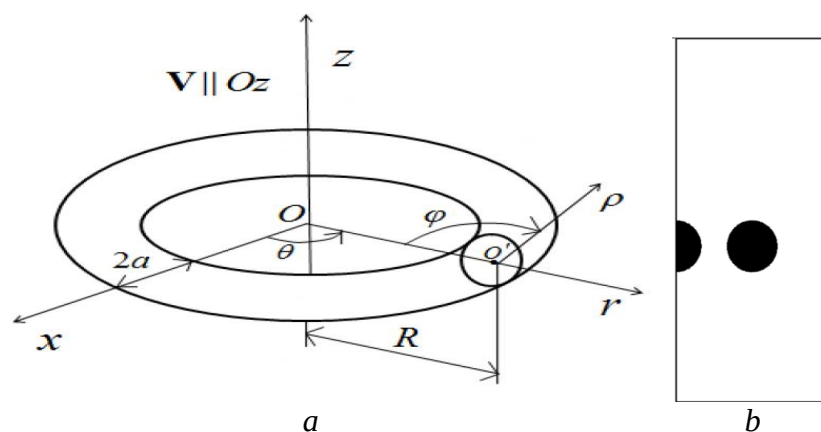


Рис.3. Иллюстративные схемы. а) одиночное вихревое кольцо, б) вихревое кольцо и осевой вихрь.

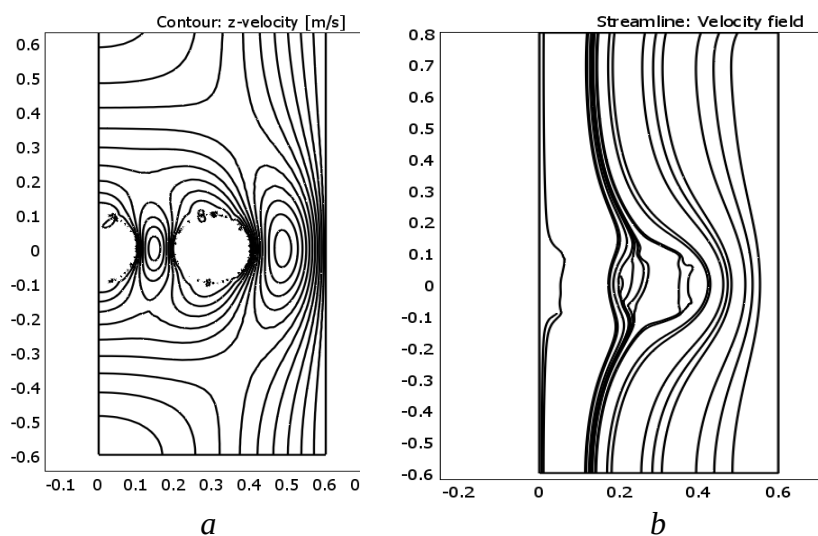


Рис.4. Контуры осевых скоростей (а) и линии тока (б) для связки «вихревое кольцо и осевой вихрь» (см. рис.3б).

Видно, что «остановленные» объемы создают некоторые препятствия для потока, и поэтому не все линии тока могут через них пробиться. Дополнительной иллюстрацией этого явления служит рис 4а, на котором представлены контуры равных скоростей потока. Следует отметить, что такое же явление – малая «прозрачность» для потока – имеет место не только для неподвижных, но и для движущихся вместе с потоком, но вращающихся объемов.

Если положить $\theta_1=0$, то шар на оси трубы выпадет из рассмотрения и останется только вихревое кольцо. Два его состояния – неподвижное и вращательное – представлены на рис. 5а и 5б. На первом из них дан профиль осевой скорости по горизонтальному сечению трубы, проходящему через центр сечения кольца. Четко видна нулевая скорость в этом сечении (такая же, как и во всем объеме). На втором из этих рисунков представлена осевая скорость в этом же сечении, когда осевое перемещение кольца осталось нулевым, но задано вращение его сечения в направлении против часовой стрелки. Это вращение задано скоростями $u=\omega(z-z_0)$ и $v=\omega(r-r_0)$, где r_0, z_0 – координаты центра сечения кольца, ω – окружная скорость.

Данные примеры иллюстрируют следующие возможности метода: «остановить» внутреннюю область полностью; остановить ее движение с потоком, но оставить вращение; задать вращение, но не останавливать. Эти возможности будут использованы в расчете полной модели турбулентности в трубе, представленной далее, в модели, в которую вошли обе вышеописанные структуры, кольцевая и шаровая.

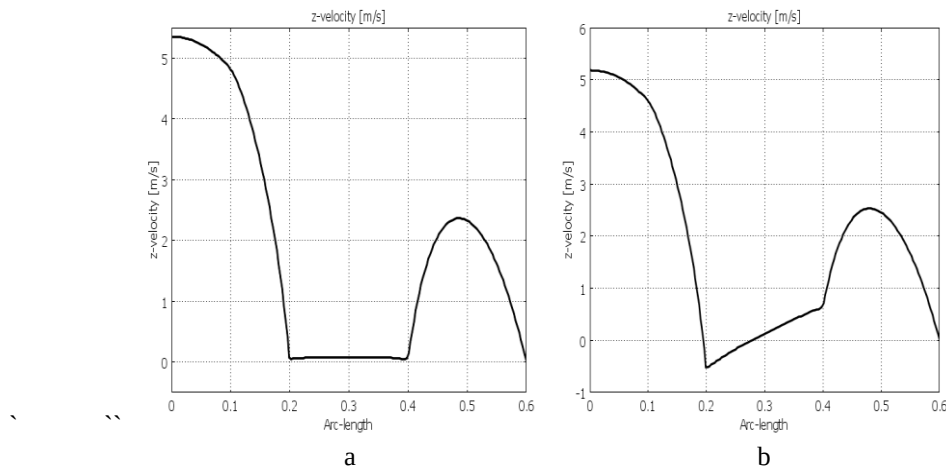


Рис.5. Осевые скорости в горизонтальном сечении через центр остановленного (относительно потока) вихревого кольца. а) неврещающегося, б) вращающегося вокруг оси тора O' (см. рис.3а) против часовой стрелки.

Модель турбулентности и ее реализация

Рассмотрим теперь применение метода к моделированию и анализу турбулентности. Обратимся к примеру, который очень близок к реальной картине турбулентности в трубах. Он основан на концепции о турбулентной «вихревой засыпке» [3-5]. Этот подход к вопросу трактует турбулентное течение как ламинарное, загруженное системой вихревых структур. Такое представление основано на аналогии с течениями в зернистом слое и, как показывают исследования [6,13], имеет с ними много общего. Оно наглядно и помогает изучению процесса.

В рассматриваемой модели турбулентные структуры представлены в виде системы вихревых колец, расположенных в шахматном порядке и движущихся вместе с жидкостью. Кольца представляют собой торы («бублики») разных радиусов, нанизанных на ось потока. Одно такое кольцо представлено на рис.1. Радиусы сечений вихревых колец уменьшаются от оси к стенкам в соответствии с известным профилем турбулентного сопротивления [5]. Расчетная область представляет собой осевое сечение отрезка трубы, расположенного вертикально. Фрагмент этого сечения представлен на рис.2. Снизу вверх через него движется вода, имеющая на входе ламинарный профиль. На стенках трубы заданы условия прилипания, выходное сечение свободно. Несмотря на свою относительную, кажущуюся простоту, такая модель дает возможности проверять расчетные методы и получать результаты, достаточно близкие к экспериментальным данным.

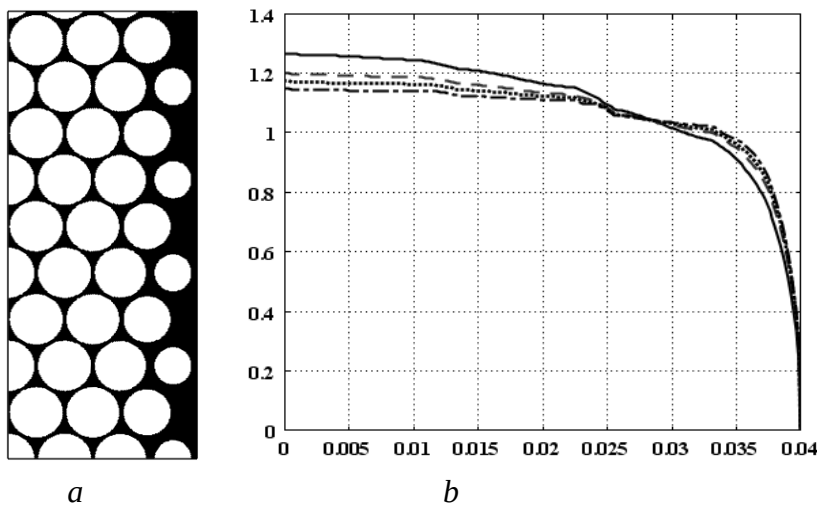


Рис.6. а) фрагмент расчетного поля в осевом сечении (правая половина трубы; белый цвет – вихревые трубки, черный – несущая жидкость. б) Расчет по методу локальных флуктуаций вязкости.

Относительная осевая скорость $y=w/w_a$ турбулентного течения в поперечном сечении трубы при наличии «вихревой засыпки» в зависимости от радиуса r , м. Кривые соответствуют $Re=10^4, 10^5, 10^6, 10^7$ – сверху вниз (в левой части рисунка).

Первым методом расчета этой модели был метод флуктуаций вязкости, представленный в работе [4]. Физическое воздействие турбулентной структуры на поток имитировалось ее большей вязкостью, менявшейся в зависимости от числа Re. Предварительно были проделаны численные эксперименты, в которых динамическое воздействие крутящегося шарового вихря сравнивалось с воздействием такого же шара другой, значительно большей вязкости. Было показано, что вращающийся объем жидкости (той же вязкости) почти «непрозрачен» для обтекающего его внешнего потока. То же имеет место и для не вращающегося, но значительно более вязкого объема. Было получено соответствие между скоростью вращения и эквивалентной ей (по динамическому воздействию на жидкость) вязкостью. Вязкость во всем расчетном поле была задана по методу локальных флуктуаций формулой $\mu = \mu_0 + (\mu_1 - \mu_0)\theta$, где μ_0 – вязкость несущей среды, μ_1 – вязкость вихревых колец, θ – характеристическая функция этих колец.

Результаты серии расчетов для различных чисел Рейнольдса, в совокупности покрывающих весь турбулентный диапазон, представлены на рис.6b. Они показывают, что данная модель вполне пригодна для получения профиля средних осевых скоростей турбулентных течений в трубах. Однако она не дает возможности получить детальную картину поля скоростей вблизи вихревых элементов, при подробном ее рассмотрении. Точнее, эта картина не будет соответствовать реальности, поскольку в реальности эти объемы вращаются и увлекают за собой прилегающие слои жидкости. Для получения реальной картины скоростей это вращение необходимо задать напрямую.

Именно такое, прямое задание окружных скоростей вращения вихревых трубок применено во втором методе реализации данной модели, методе встроенных решений. В этом методе система вихрей задана не как набор флуктуаций вязкости, а как система вихрей той же вязкости, но вращающихся в заданных направлениях с заданными окружными скоростями. Такая постановка задачи существенно ближе к реальности. Задавая возможные варианты распределения положений, размеров вихрей и их окружных скоростей, получаем не только поля скоростей, но и их распределение в конкретных зонах – в окрестностях вихрей, вихревых и дипольных трубок. Результаты расчета потока при $Re=4 \cdot 10^5$ представлены на рис.7.

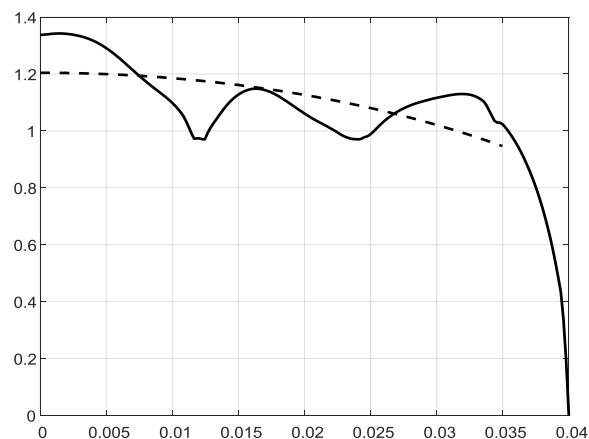


Рис.7. Расчет по методу встроенных решений. Относительная осевая скорость при $Re=4 \cdot 10^5$ - сплошная линия. Аппроксимация по формуле (13) – пунктирная линия. 6

Результаты расчета по первому методу (рис.6b) дают (что естественно) неравномерное поле скоростей, вызванное наличием внутренних структур. Результаты расчета того же потока по второму методу (рис.7) оказываются еще более неравномерными. Поскольку поле скоростей чрезвычайно немонотонно, его усреднение, получение средней осевой скорости является непростой задачей и требует принятия определенных принципов усреднения. Для решения этой задачи привлечем результаты работы [3], в которой было отмечено, что профиль средних осевых скоростей ядра турбулентного течения в трубах достаточно точно аппроксимируется выражением

$$y_a = y(0) \sqrt{1 - x^2 / 2}, \quad (13)$$

где $y=v/v_{cp}$, $x=r/r_0$ – относительные скорость и радиус трубы, v_{cp} – средняя скорость, r_0 – радиус. Это выражение является универсальным, т.к. оно не зависит от числа Re. Для

нахождения числа $y(0)$ – относительной скорости на оси потока – используем баланс расхода через площадь турбулентного ядра потока, ограниченную радиусом «особой точки» турбулентных профилей осевых скоростей. Особая точка – это экспериментально найденная на графиках $y=f(x)$ точка, где $y=1$ и $x=x_k \approx 0,75$ при всех значениях чисел Рейнольдса [13-15]. Используя баланс расхода Q_k

$$2\pi \int_0^{x_k} y(0) \sqrt{1 - x^2 / 2} dx = 2\pi \int_0^{x_k} y(x) x dx = Q_k,$$

и особую точку x_k , получаем

$$y(0) = 0,612 Q_k.$$

Вычислив значение $y(0)$, получаем усредненный профиль скорости, представленный пунктиром на рис.7. На этом рисунке дан профиль осевой скорости в том же сечении расчетной области, что и на рис.6, в сечении по центрам вихревых колец данного уровня. Нужно отметить, что представленный на нем результат является лишь примером анализа турбулентности в трубах, проверкой и подтверждением пригодности предлагаемой методики для такого анализа.

Стоит отметить, что выражение (13), предложенное нами в качестве аппроксимирующего для профиля средних осевых скоростей турбулентного течения, основано на виде уравнения для турбулентного течения в трубах

$$y'' + \frac{y'}{x} = G \left(1 - \frac{y^2}{y^2(0)(1 - x^2/2)} \right) = G \left(1 - \left(\frac{y}{y_a} \right)^2 \right), \quad (14)$$

предложенного в работе [3], а также проверено сравнением с кривыми, построенными по обобщающей эксперименты формуле Рейхардта [16]. Таким образом, y_a является некоторым масштабом скоростей для вычисления доли турбулентных потерь, которой является величина $(y/y_a)^2$ по сравнению с единицей. Не случайной является и величина $x^2/2$. В работе [13] отмечено, что замена переменной $t=x^2/2$ в уравнении ламинарного движения в цилиндрических трубах приводит к линейному профилю решения для ламинарного течения и упрощает вид уравнения (14), т.е. является органической для данной системы координат. Практически линейным оказывается и профиль турбулентных скоростей в пределах от оси до особой точки. Таким образом, аппроксимация (13) является теоретически и практически обоснованной.

Представленные результаты – метод расчета и метод обработки результатов – это два основных аспекта, необходимых для проведения работ по анализу влияния различных турбулентных структур на «итоговые» параметры турбулентных потоков.

Обсуждение

Рассмотрим преимущества и ограничения предлагаемой методики. Ее преимуществами являются:

- a) программное задание «встроенных» областей, их геометрии и решений (поведения среды) в них, незаменимое в тех случаях, когда «ручное» их задание невозможно (например, для фрактальных структур),
- b) одновременное получение картины решения во всех областях,
- c) возможность применения к существующим программам без их изменения (к программам, в которых доступно «формульное» задание правых частей уравнений). То или иное задание правой части переделкой не является,
- d) отсутствие необходимости задания граничных условий для встроенных областей – они получаются автоматически.

В приложении к гидродинамике метод дает возможность моделирования турбулентных потоков на основе моделей, очень близких к реальности, без введения каких-либо искусственных замен. Метод позволяет находить решения и обратных задач. Примером является задача, решенная Мураки [11], о движении вихревого диполя в стратифицированной жидкости над твердой поверхностью. Предлагаемым методом можно решить обратную задачу – по заданному движению вихревого диполя определить, как будет меняться картина касательных напряжений вокруг диполя (при том или ином градиенте температур).

Кроме нахождения самих полей, предлагаемый метод позволяет определить, какими физическими средствами (источниками или стоками в тепловых задачах, градиентами давления – в гидродинамических) можно поддерживать заданные распределения температур или скоростей. Величины и положение этих средств воздействия полностью определяются функциями, задающими правые части решаемых уравнений. Метод является

точным. Результаты задания исходных данных ручным (когда это возможно) или программным образом совершенно идентичны. Поэтому идентичны и результаты расчетов по этим данным, что снимает вопрос о точности метода. Погрешности при моделировании могут определяться только степенью близости к реальности рассматриваемой модели, а также точностью счета.

Метод имеет и ограничения. Его невозможно применить к внутренним структурам (областям), формы которых настолько нерегулярны, что их нельзя запрограммировать, т.е. еще более сложным, чем фракталы. То же относится и к внутренним областям, условия на границах которых (вместе с их внутренним поведением) нельзя описать аналитическими выражениями. Для большей части задач эти ограничения несущественны.

Заключение

Предложенный метод позволяет задавать условия и решать достаточно сложные задачи математической физики, в которых расчетное поле включает области с известным поведением, отличающимся от неизвестного, искомого поведения основной среды. Метод применим и в тех случаях, когда задание условий – геометрии и решений во встроженных областях – невозможно иным образом, кроме программного. Он позволяет моделировать физические процессы с условиями, близкими к натурным. Это относится в первую очередь к моделированию турбулентности. На примере расчета турбулентного течения в трубе, а также на других примерах показано, что метод работоспособен и дает удовлетворительные результаты. Дальнейшее применение предлагаемого метода, а именно моделирование турбулентности с учетом каскадных фрактальных структур, составит предмет дальнейших разработок.

Литература

1. Rodriguez S. Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling. Springer AG; 2019.
2. Wilcox, D.C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc; 2006.
3. Меламед Л.Э. Уравнение турбулентного движения в трубах // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 24. С. 23-28. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42592>.
4. Меламед Л.Э. Метод локальных флуктуаций и моделирование неоднородных сред // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 19. С. 31–37. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43761>.
5. Меламед Л.Э., Филиппов Г.А. Моделирование турбулентности как «вихревой засыпки» // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19. № 9-10. С. 122-132.
6. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск. 2005. 358 с.
7. Baumert H.Z. Universal equations and constants of turbulent moution // Physica Scripta. 2013. V. 155. pp. 1-12.
8. Afanasyev Y.D., Korabel V.N. Starting vortex dipoles in a viscous fluid: Asymptotic theory, numerical simulations, and laboratory experiments // Physics of Fluids. 2004. V.16. №11. pp. 3850-3858.
9. Lacaze L., Brancher P., Eiff O., et al. Experimental characterization of the 3D dynamics of a laminar shallow vortex dipole // Experiments in Fluids. 2010. V. 48. № 2. pp. 225-231.
10. Sokolovskiy M. A., Cartonb X. J., Filyushkinc B. N., et al. Interaction between a surface jet and subsurface vortices in a three-layer quasi-geostrophic model // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2016. V.110. №3. pp.1-23.
11. Muraki D., Snyder Ch. Vortex Dipoles for Surface Quasigeostrophic Models // Journal of The Atmospheric Sciences. 2007. V. 64. pp. 2961-2967.
12. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч.2. М. Физматгиз. 1963. 727с.
13. Меламед Л.Э., Филиппов Г.А. Обобщенная формула для скорости турбулентных и ламинарных течений в трубах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20. № 7–8. С. 136-146.
14. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow // Journal of Fluid Mechanics. 1998. V. 373. pp. 33-79.
15. McKeon B J., Li J., Jiang W, et al. Further observations on the mean velocity distribution in fully developed pipe flow // Journal of Fluid Mechanics. 2004. V. 501. pp. 135-147.
16. Reichardt H. Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeit sverteilung in glatten Leitugen // Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik. 1951. Db. 31. N.7. pp. 208-219.

Автор публикации

Меламед Лев Эммануилович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник акционерного общества «Интеллект», г. Москва. E-mail: lev.melamed@yandex.ru.

References

1. Rodriguez S. Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling. Springer AG; 2019. doi 10.1007/978-3-030-28691-0.
2. Wilcox DC. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc; 2006.
3. Melamed LE. Uravnenie turbulentnogo dvizheniya v trubakh. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2015;41(24):23–28. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42592>.
4. Melamed LE. Metod lokal'nykh fluktuatsii i modelirovanie neodnorodnykh sred. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2016;42(19):31-37. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43761>.
5. Melamed LE, Filippov GA. Modelirovanie turbulentnosti kak «vikhrevoi zasypki». *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2017;19(9-10):122-132.
6. Gol'dshtik MA. *Protsessy perenosa v zernistom sloe*. Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, Novosibirsk. 2005.
7. Baumert HZ. Universal equations and constants of turbulent moution. *Physica Scripta*. 2013;155. :1-12. doi:10.1088/0031-8949/2013/T155/014001.
8. Afanasyev YD, Korabel VN. Starting vortex dipoles in a viscous fluid: Asymptotic theory, numerical simulations, and laboratory experiments. *Physics of Fluids*. 2004;16(11):3850-3858. doi: 10.1063/1.1790493.
9. Lacaze L, Brancher P, Eiff O, et al. Experimental characterization of the 3D dynamics of a laminar shallow vortex dipole. *Experiments in Fluids*. 2010;48(2):225-231.
10. Sokolovskiy MA, Cartonb XJ, Filyushkinc BN, et al. Interaction between a surface jet and subsurface vortices in a three-layer quasi-geostrophic model. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. 2016;110(3):1-23. <http://dx.doi.org/10.1080/03091929.2016.1164148>.
11. Muraki D, Snyder Ch. Vortex Dipoles for Surface Quasigeostrophic Models. *Journal of The Atmospheric Sciences*. 2007;64:2961-2967. doi:10.1175/JAS3958.1.
12. Kochin NE, Kibel' IA, Roze NV. *Teoreticheskaya gidromekhanika*. Ch.2. M. Fizmatgiz. 1963.
13. Melamed LE, Filippov GA. Obobshchennaya formula dlya skorosti turbulentnykh i laminarnykh techenii v trubakh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2018;20(7-8):136-146. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-136-146.
14. Zagarola MV, Smits AJ. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998;373:33-79.
15. McKeon B J, Li J, Jiang W, et al. Further observations on the mean velocity distribution in fully developed pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2004;501:135-147.
16. Reichardt H. Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1951;31(7):208-219.

Author of the publication

Lev E. Melamed – Joint-stock company "Intelligence", Moscow, Russia. E-mail: lev.melamed@yandex.ru.

Поступила в редакцию

11 сентября 2020г.



ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ТОПЛИВА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Г.Е. Марьин^{1,2}, Б. М. Осипов¹, П. Зунино³, Д.И. Менделеев^{1,2}

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2» г. Казань, Россия

³Университет Генуи, Генуя, Италия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7229-412X>, george64199@mail.ru

obm0099@ya.ru,

pietro.zunino@unige.it

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9821-1281>, Dylankn@ya.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Изучить возможность сжигания в стационарной энергетической газотурбинной установке General Electric PG111 6FA природного газа разных месторождений. *МЕТОДЫ.* Для проведения исследований определена аппроксимация термодинамических свойств топлив различного состава. В настоящее время газотурбинные технологии представляют собой одну из самых стабильно развивающихся областей, связанных с модернизацией генерирующего оборудования. В республике Татарстан происходит модернизация электрических станций единичными газотурбинными установками, так и установками в составе парогазового энергоблока. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведенные исследования позволяют оценить влияние компонентного состава топлива на работоспособность газовой турбины. Сравнительные исследования позволяют оценить изменения энергетических характеристик газовой турбины, работающей в составе парогазового энергоблока. Исследование показывает, что изменения состава топлива оказывает влияние на энергетические характеристики газотурбинной установки (коэффициент полезного действия, расход воздуха). Работа при отклонении индекса Воббе не допустима. Отклонение индекса Воббе для города Заинска составляет 5,29 %, следовательно, при установке газовой турбины GE PG111 6 FA необходимо изменить настройку топливной системы. Для синтез-газа отклонение индекса Воббе составило 22,23%, применение данного топлива недопустимо, без изменения конструкции и настройки топливной системы, так как пропускная способность топливной системы не рассчитана на расход 27,8 кг/с. Наименьшие значения количества CO₂, NO, O₂ в составе продуктов сгорания достигаются на топливном газе города Казани. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование синтез-газа, как единственного топлива, нежелательно при работе газовой турбины в парогазовом блоке, так как теплотворная способность уходящих газов при работе на синтез-газа минимальна и составляет 94,3 МВт – это окажет влияние на работу паровой турбины.

Ключевые слова: Парогазовая установка, газотурбинная установка, топливный газ, состав топлива, коэффициент полезного действия, экология, выбросы в атмосферу.

Для цитирования: Марьин Г.Е., Осипов Б. М., Зунино П. Менделеев Д.И., Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5 С. 41-51.
doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-5-41-51.

INFLUENCE OF FUEL COMPOSITION ON ENERGY PARAMETERS OF GAS TURBINE PLANT

GE. Marin^{1,2}, DI. Mendelev^{1,2}, BM. Osipov¹, P. Zunino³

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²JSC "Tatenergo" branch "Kazan CHP-2", Kazan, Russia

³University of Genova, Genova, Italy

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7229-412X>, george64199@mail.ru

obm0099@ya.ru

pietro.zunino@unige.it

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9821-1281>, Dylankn@ya.ru

Abstract: *PURPOSE.* This article describes the possibility of burning natural gas from different fields in a stationary power gas turbine General Electric 6FA. *METHODS.* Currently, gas turbine technologies are one of the most stably developing areas related to the modernization of generating equipment. At present, modernization of power plants is underway both with gas turbine units and with units in the combined-cycle power unit in the Republic of Tatarstan. The conducted studies allow us to evaluate the effect of the component composition of the fuel on the performance of a gas turbine. Comparative studies make it possible to evaluate changes in the energy characteristics of a gas turbine operating as part of a combined cycle gas turbine unit. *RESULTS.* The study shows that changes in the fuel composition have an impact on the energy characteristics of a gas turbine plant (efficiency, air consumption). Work with a deviation of the Wobbe index is not permissible. The deviation of the Wobbe index for the city of Zainsk is 5.29%, therefore, when installing a gas turbine it is necessary to change the setting of the fuel system. For synthesis gas, the deviation of the Wobbe index was 22.23%, the use of this fuel is unacceptable without changing the design and setting of the fuel system, since the throughput of the fuel system is not designed for a flow rate of 27.8 kg/s. The smallest values of the amount of CO₂, NO, O₂ in the composition of the combustion products are achieved on the fuel gas of the city of Kazan. *CONCLUSION.* The use of synthesis gas as the only fuel is undesirable when operating a gas turbine in a combined-cycle unit, since the calorific value of the flue gases when operating on synthesis gas is minimal and amounts to 94.3 MW, which will affect the operation of the steam turbine.

Keywords: Combined cycle plant, gas turbine plant, fuel gas, fuel composition, efficiency, ecology, air emissions.

For citation: Marin GE, Osipov BM, Zunino P, Mendelev DI. Influence of fuel composition on energy parameters of gas turbine plant. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22 (5): 41-51. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-41-51.

Введение

Замена и модернизация устаревших мощностей тепловых электрических станций газотурбинными установками процесс объективный и закономерный. Это обусловлено более высоким коэффициентом полезного действия (КПД) бинарных циклов по сравнению с классическими паротурбинными циклами. Основным видом топлива для работы газовых турбин является природный газ, но альтернативой может быть сжиженный природный газ (СПГ), сжиженный углеводородный газ (СУГ), синтез-газ. При эксплуатации газовых турбин к топливному газу предъявляются высокие требования по качеству, чистоте, постоянству состава. В зависимости от территориального расположения тепловой станции состав используемого топлива будет изменяться. Независимо от условной формулы топлива должны быть выполнены следующие условия:

1. Устойчивость к самовозгоранию;
2. Устойчивость к обратному зажиганию;
3. Соответствие экологическим требованиям;
4. Устойчивость к микровзрывам.

Состав природного газа определяет процесс горения и дальнейшее образование продуктов сгорания, изменение энергетических характеристик газотурбиной установки. В

этом случае необходимо учитывать различие термодинамических свойств рабочих тел и влияние их на процесс горения. [1-5]

Материалы и методы

Состав природного газа может не изменяться из-за источника его месторождения, но может изменяться с течением времени [6-8]. Для исследований влияния топливного газа на работу газовой турбины, рассмотрены составы природного газа, на которых работают тепловые электрические станции Республики Татарстан.

В Республике Татарстан в настоящий момент работают газотурбинные установки (ГТУ) разной мощности и производителей. Установки НК-37 (ПАО "Кузнецов") мощностью 25 МВт установлена на Казанской ТЭЦ-1, ГТУ MS 5001 мощностью 25 МВт установлена на предприятии Нижнекамскнефтехим, ГТУ LM2500+G4 (GE) мощностью 25 МВт установлена на предприятии Кастамону Интегрейтед Вуд Индастри, ГТУ PG1116FA (GE) мощностью 110 МВт установлены на Казанских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, ГТУ 9HA.01 (GE) мощностью 405,6 МВт установлена на Казанской ТЭЦ-3.

Для исследований выбрана газовая турбина GE PG1116FA мощностью 110 МВт (табл.1). На казанских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 суммарно установлено четыре таких машин.

Таблица 1

Технические характеристики газотурбинной установки PG6111FA

Характеристика	Размерность	Значение
Мощность на клеммах генератора	кВт	77211
Атмосферное давление	кгс/см ²	1,013
Температура на входе в компрессор	°С	15
Относительная влажность на входе в компрессор	%	60
Падение давления в системе впуска	мм вод.ст.	85
Статическое давление на выпуске при условиях ISO	мм вод.ст.	350
Низшая теплотворная способность топлива	кДж/кг	49194
Температура топлива	°С	30
Давление топлива перед газовым модулем	МПа	2,59 – 3,08
Коэффициент мощности		0,85
Количество ступеней в компрессоре	шт	18
Количество ступеней в турбине	шт	3
Расход воздуха	м ³ /с	166
Степень сжатия		15,8
Температура воздуха после компрессора	°С	385
Температура уходящих газов	°С	603
Температура газов после камеры сгорания	°С	1325

Газотурбинная установка является одновальным осевым турбоагрегатом, оснащенный 18-ти ступенчатым компрессором с одним рядом поворотных направляющих лопаток на входе в компрессор, шестью камерами сгорания, а также 3-х ступенчатой турбиной с воздушным охлаждением на всех трех сопловых ступенях. Привод генератора осуществляется через понижающий редуктор на переднем конце вала компрессора.

Газовая турбина PG6111FA специально сконструирована для работы в парогазовом цикле. Тепло горячих выхлопных газов от ГТУ используется в котле-утилизаторе для получения перегретого пара.

Для исследования влияния различных составов топлив была создана математическая модель ГТУ с помощью программного комплекса АС ГРЭТ [9], разработанного коллективом авторов в КГЭУ. Схема моделирования ГТУ и функциональная схема представлены на рис. 1-2. Входными данными приняты следующими:

Атмосферное давление на входе в компрессор: $P_{вх} = 0,101325$ МПа,

Температура воздуха на входе в компрессор: $T_{вх} = 288$ К,

Относительная влажность на входе в компрессор 60%,

Температура уходящих газов: $T_{вых} = 874$ К,

В связи с тем, что газовая турбина работает в составе энергоблока, необходимо поддерживать температуру уходящих газов постоянной, поэтому при исследованиях мощность газовой турбины принята равной 77 МВт [10-14].

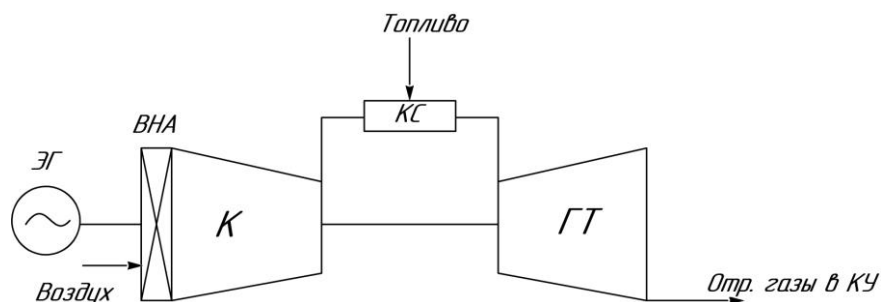


Рис.1. Схема моделирования газотурбинной установки в АС «ГРЭТ»
ЭГ – электрогенератор; ВНА – входной направляющий аппарат; К – компрессор; КС – камера сгорания;
ГТ – газовая турбина; КУ – котел-утилизатор.

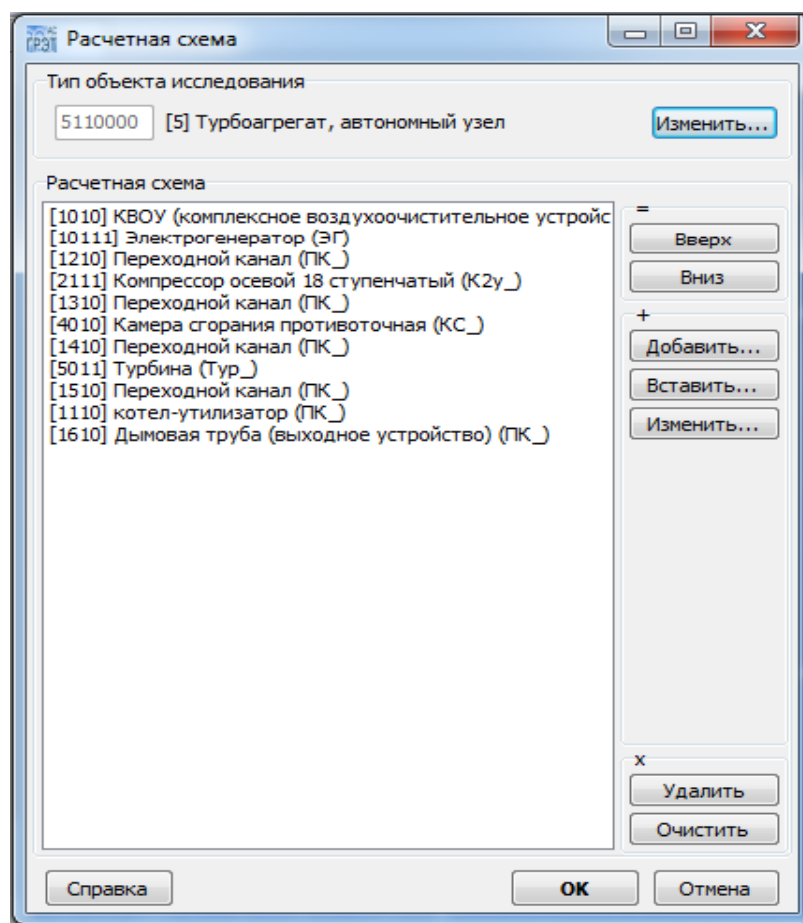


Рис.2. Расчетная схема газотурбинной установки PG1116FA в АС «ГРЭТ»

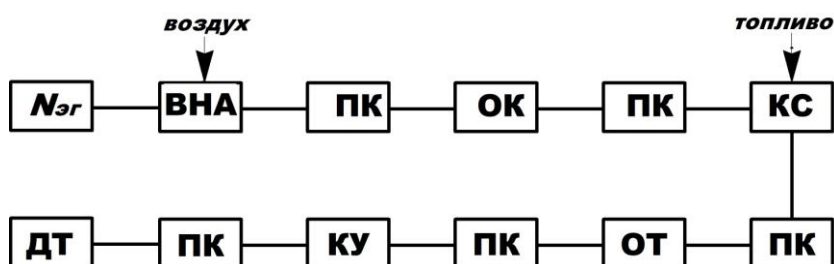


Рис.3. Функциональная схема газотурбинной установки PG1116FA в АС «ГРЭТ»

Для исследований влияний топливного газа выбраны составы природного газа, подаваемого с разных месторождений на крупные тепловые станции республики Татарстан приведенного в табл. 2.

Таблица 2

Составы природного газа, подаваемого с разных месторождений на крупные тепловые станции Республики Татарстан

№	Наименование показателя	Единица измерения	Состав газа				
			Казань	Заинск	Набережные Челны	Нижнекамск	Елабуга
1	Метан	Молярная доля, %	94,03	92,43	95,65	95,78	94,7
2	Этан		3,68	2,94	2,55	2,09	3,02
3	Пропан		1,2	0,423	0,87	0,65	1,22
4	Изобутан		0,189	0,0208	0,148	0,109	0,165
5	Гексаны		0,0218	0,0093	0,0063	0,0169	0,0127
6	Кислород		0,005	0,0172	0,005	0,0068	0,0062
7	Азот		0,601	4,16	0,606	1,2	0,651
8	Двуокись углерода		0,283	0,005	0,172	0,157	0,233
9	Теплота сгорания (низшая)	МДж/м ³	35,11	33,06	34,57	34,14	34,78

Для проведения исследований проведена аппроксимация термодинамических свойств топлив различного состава, представлены в табл. 3. В Республике Татарстан много нефтяных месторождений и как альтернатива традиционному природному газу, в работе представлен синтез-газ.

Таблица 3

Аппроксимация термодинамических свойств топлив различного состава

№	Наименование	C	H	N	O	Энтальпия, кДж/кг
1	Казань	6,0504	22,92836	0,280161	0,05647	-4506,71
2	Заинск	6,0328	22,77186	0,239388	0,05643	-4432,81
3	Нижнекамск	5,8941	22,67867	0,308787	0,05642	-4479,65
4	Елабуга	5,8966	23,00278	0,353526	0,05642	-4515,38
5	Набережные челны	5,9568	22,8712	0,343689	0,05643	-4502,23
6	Елабуга	5,9981	22,9133	0,273251	0,05646	-4502,12
7	Синтез-газ	3,064	1,4888	0,0714	3,71201	-7285,64

Результаты и Обсуждение

В результате расчетов найдены основные энергетические характеристики газотурбинной установки, приведённые в табл. 4.

Для оценки работоспособности газовой турбины при максимальных нагрузках рассчитан мгновенный расход топлива для разного состава топлива представлен на рис 4.

Таблица 4

Основные энергетические характеристики газотурбинной установки

№	Наименование	Обозначение	Единица измерения						
				Казань	Зинск	Нижнекамск	Наб. челны	Елабуга	Синтез-газ
1	Температура торможения на входе в двигатель	T	К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15
2	Давление торможения на входе в двигатель	P	МПа	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013
3	Суммарный расход воздуха на входе в двигатель	G_v	кг/с	200	194,1	194,9	197	202	186,2
4	Суммарный расход отработавших газов на выходе из двигателя	G_o г	кг/с	204,42	198,79	199,36	201,52	206,64	214
5	КПД	η	-	35,156	35,163	35,143	35,11	35,097	0,2344
6	Мгновенный расход топлива	G_T	кг/с	4,42	4,696	4,46	4,52	4,64	27,8
7	Суммарный часовой расход топлива	G_T	м ³ /ч	16687,8	16906,2	16057,3	16561,4	16425,3	100096,3

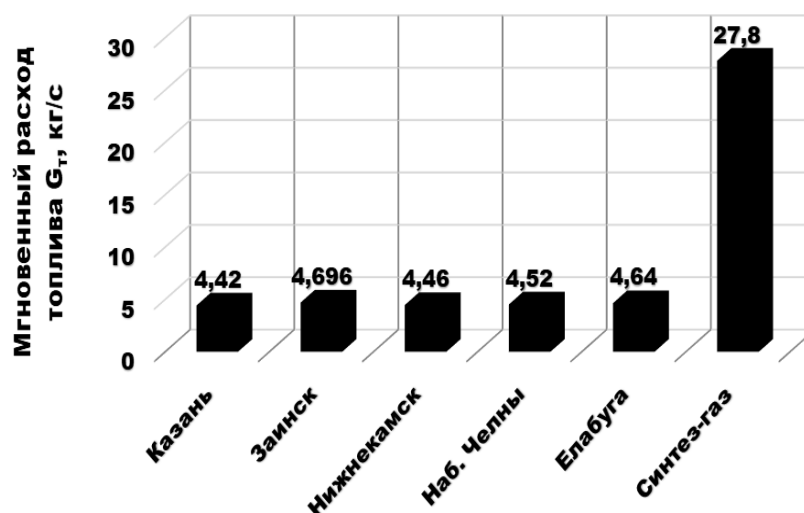


Рис.4. Мгновенный расход для разного состава топлива

Используя, полученные в программном комплексе АС ГРЭТ данные, рассчитываются значения количества CO_2 , NO , O_2 в составе продуктов сгорания по формулам, представленным ниже:

$$Q_{CO_2} = G_m \times q_{CO_2} \quad (1)$$

G_m – расход топлива, кг/с,

$\bar{q}_{CO_2}$ – показатель относительного расхода компонента состава выхлопа.

$$Q_{NO} = G_m \cdot q_{NO} \quad (2)$$

где G_m – расход топлива кг/с, $\bar{q}_{NO}$ – показатель относительного расхода компонента состава выхлопа.

$$Q_{O_2} = G_m \times q_{O_2} \quad (3)$$

где G_m – расход топлива кг/с, $\bar{q}_{O_2}$ – показатель относительного расхода компонента состава выхлопа.

Результаты расчетов сведены в табл. 5.

Таблица 5

Содержание CO ₂ , NO _x , O ₂ в кг/с в выхлопе газотурбинной установки						
	Казань	Заинск	Нижекамск	Наб. Челны	Елабуга	Синтез-газ
$\bar{q}_{CO_2}$	0,0348	0,0378	0,0378	0,0342	0,03518	0,012
$\bar{q}_{NO}$	0,0754	0,06612	0,0751	0,0748	0,0748	0,165
$\bar{q}_{O_2}$	0,1316	0,102	0,1057	0,1012	0,1013	0,121
Q_{CO_2} , кг/с	0,153816	0,177509	0,168588	0,154584	0,163235	0,3336
Q_{NO} , кг/с	0,333268	0,3105	0,334946	0,338096	0,347072	4,587
Q_{O_2} , кг/с	0,581672	0,478992	0,471422	0,457424	0,470032	3,3638

Степень взаимозаменяемости газообразных видов топлива для топливной системы газовой турбины измеряется индексом Воббе (W_n). Допустимый диапазон изменения индекса Воббе задается так, чтобы гарантировать правильную работу топливной системы в эксплуатации турбины. При использовании нескольких видов газообразного топлива, например, основного и резервного, необходимо учитывать отклонение индекса Воббе. Допустимый диапазон изменения индекса Воббе $\pm 5\%$, что позволяет работать газовой турбине в допустимых пределах изменения выбросов и динамики горения, расхода топливного газа, при большем отклонении турбина не будет работать в оптимальном режиме. [15-20] Изменение индекса Воббе представлен на рис.5

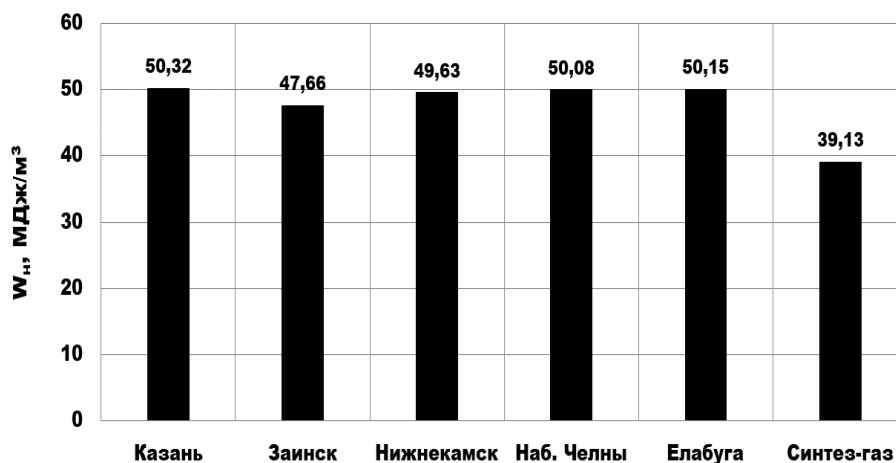


Рис.5. Изменение индекса Воббе в зависимости от типа топливного газа

При работе газовой турбины на разных видах топливного будет различна теплота уходящих газов (температура постоянная и количество тепла зависит от расхода). Количество теплоты уходящих газов рассчитываем по следующей формуле:

$$Q_{ух.г} = \Delta H \cdot G_{ух.г} \quad (4)$$

где $Q_{ух.г}$ – количество теплоты уходящих газов, МВт ΔH – разница полных энтальпий на входе и выходе котла-утилизатора, кДж/кг, $G_{ух.г}$ – расход уходящих газов, кг/с

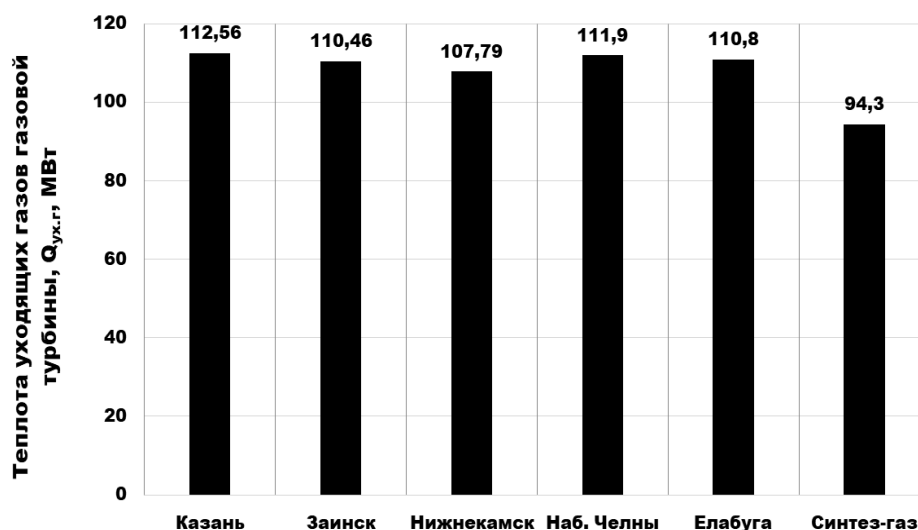


Рис.6. Теплота уходящих газов газовой турбины в зависимости от типа топлива

Закключение

1. Исследование показывает, что изменения состава топлива оказывает влияние на энергетические характеристики ГТУ (КПД, расход воздуха).
2. Работа при отклонении индекса Воббе не допустима. Отклонение индекса Воббе для города Заинска составляет 5,29 %, следовательно, при установке газовой турбины *GEPC111 6 FA* необходимо изменить настройку топливной системы. Для синтез-газа отклонение индекса Воббе составило 22,23%, применение данного топлива недопустимо, без изменения конструкции и настройки топливной системы, так как пропускная способность топливной системы не рассчитана на расход 27,8 кг/с.
3. Наименьшие значения количества CO_2 , NO , O_2 в составе продуктов сгорания достигаются на топливном газе города Казани.
4. Использование синтез-газа как единственного топлива нежелательно при работе газовой турбины в парогазовом блоке, так как теплотворная способность уходящих газов при работе на синтез-газа минимальна и составляет 94,3 МВт, что окажет влияние на работу паровой турбины.

Литература

1. Kotowicz J., Job M., Brzeczek M. The characteristics of ultramodern combined cycle power plants // *Energy*. 2015. V. 92(12). pp. 197-211.
2. Vries de H., Mokhov A. V., and Levinsky H. B. The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances // *Applied Energy*. 2017. V. 208. pp. 1007-1019.
3. Cho H.M. and He B.Q. Combustion and emission characteristics of a lean burn natural gas engine // *(International Journal of Automotive Technology)*. 2008. V. 9.b N 4. pp. 415-422.
4. Lokini P., Roshan D K and Kushari A. Influence of Swirl and Primary Zone Airflow Rate on the Emissions and Performance of a Liquid-Fueled Gas Turbine Combustor // *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme. Proceedings Paper*. 2019. V. 141. N 6. P. 9.
5. Marin G.E., Mendelev D.I., Akhmetshin A.R. Analysis of Changes in the Thermophysical Parameters of the Gas Turbine Unit Working Fluid Depending on the Fuel Gas Composition // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok: IEEE, 2019. pp. 1-4.
6. Pujihatma P., Hadi S.P., Sarjiya, et al. Combined heat and power - multi-objective optimization with an associated petroleum and wet gas utilization constraint // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018. V. 54. pp. 25-36.
7. Сорока Б.С., Воробьев Н.В. Эффективность использования газового топлива и окислительной смеси при их увлажнении // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2019. Т. 62. №. 6.
8. Сорока Б.С. Влияние климатических факторов на теплотехнические характеристики, энергетическую эффективность и оценка экологических последствий сжигания газового топлива // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2017. №. 4-6. С. 116-129.

9. Менделеев Д.И., Марьин Г.Е., Ахметшин А.Р. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3(43). С. 47-56.
11. Mehrpanahi and Payganeh G.H. Multi-objective optimization of IGV position in a heavy-duty gas turbine on part-load performance // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 125. pp. 1478-1489,
12. Zheng L.K., Cronly J, Ubogu E, et al. Experimental investigation on alternative fuel combustion performance using a gas turbine combustor // *Applied Energy*. 2019. V. 238. pp. 1530-1542,
13. Zheng L.K., et al. Effects of Alternative Fuel Properties on Particulate Produced in a Gas Turbine Combustor // *Energy & Fuels*. 2018. V. 32. N. 9. pp. 9883-9897.
14. Esclapez L., et al. Fuel effects on lean blow-out in a realistic gas turbine combustor // *Combustion and Flame*. 2017. V. 181. pp. 82-99,
15. Батрамеєв В.А., Илясов Л.В. Математическая модель сигнала анализатора низшей объемной теплоты сгорания газообразных топлив // Математические методы в технике и технологиях–ММТТ-23: Сб. трудов 23 Междунар. науч. конф. 2011. Т. 12. С. 124.
16. Батрамеєв В.А., Варламов А. П., Илясов Л. В. Лабораторный анализатор низшей объемной теплоты сгорания газов // *Технологии нефти и газа*. 2012. №. 2. С. 61-64.
17. Madhlopa A. Gas Turbine Fuels and Fuel Systems" in *Principles of Solar Gas Turbines for Electricity Generation (Green Energy and Technology* // New York: Springer. 2018. pp. 27-49.
18. Liu JL and CE. Dumitrescu. Numerical Investigation of Methane Number and Wobbe Index Effects in Lean-Burn Natural Gas Spark-Ignition Combustion // *Energy & Fuels*. 2018. V. 33. N. 5. pp. 4564-4574.
19. Shaker M., Sundfor E., Farine G. Design and Optimization of a Low Power and Fast Response Viscometer Used for Determination of the Natural Gas Wobbe Index // *Ieee Sensors Journal*. 2019. V. 19. N 23. pp. 10999-11006.
20. Roy P.S., Ryu C and Park CS. Predicting Wobbe Index and methane number of a renewable natural gas by the measurement of simple physical properties. 2018. *Fuel*. V. 224. pp. 121-127.

Авторы публикации

Марьин Георгий Евгеньевич – Старший преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет. Старший машинист энергоблоков цеха парогазовых установок АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2».

Осипов Борис Михайлович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет.

Пьетро Зунино – д-р наук, Директор департамента машиностроения, энергетики, управления и транспортного машиностроения (DIME), Университет Генуи, Италия.

Менделеев Дмитрий Иванович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет. Машинист – обходчик цеха парогазовых установок АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2».

References

1. Kotowicz J, Job M., Brzeczek M. The characteristics of ultramodern combined cycle power plants. *Energy*. 2015; 92(12):197-211. doi: 10.1016/j.energy.2015.04.006.
2. Vries de H. Mokhov AV, and Levinsky HB. The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances. *Applied Energy*. 2017;208:1007-1019. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.049.
3. Cho HM. and He BQ. Combustion and emission characteristics of a lean burn natural gas engine. *International Journal of Automotive Technology*. 2008;9(4):415-422. doi: 10.1007/s12239-008-0050-5.
4. Lokini P, Roshan D.K and A Kushari. Influence of Swirl and Primary Zone Airflow Rate on the Emissions and Performance of a Liquid-Fueled Gas Turbine Combustor. *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme*. Proceedings Paper. 2019;141(6):p. 9. doi: 10.1115/1.4042410.
5. Marin GE, Mendelev DI, et al. Analysis of Changes in the Thermophysical Parameters of the Gas Turbine Unit Working Fluid Depending on the Fuel Gas Composition. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok: IEEE, 2019. P. 1-4. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934021.
6. Pujihatma P, Hadi SP, Sarjiya and et al. Combined heat and power - multi-objective optimization with an associated petroleum and wet gas utilization constraint. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018;54:25-36. doi: 10.1016/j.jngse.2018.03.025.

7. Soroka BS, Vorobev NV. Efficiency of using gas fuel and an oxidizing mixture when they are we *Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2019;62:6.
8. Soroka BS. Influence of climatic factors on heat engineering characteristics, energy efficiency and environmental impact assessment of gas fuel combustion. *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*. 2017;4-6:116-129.
9. Osipov BM and Titov AV. *Automated system of gas-dynamic calculations of energy turbomachines: Proc. Manual*. Kazan: Kazan. State Power Engineering University. 2012. 277 p.
10. Mendelev DI, Marin G.E, Akhmetshin AR. Performance characteristics of the combined cycle power regime CCP-110 MW at partial loads. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2019;11(3):(43):47-56.
11. Mehrpanahi and Payganeh GH. Multi-objective optimization of IGV position in a heavy-duty gas turbine on part-load performance. *Applied Thermal Engineering*. 2017;125:1478-1489. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.091.
12. Zheng L.K, Cronly J, Ubogu E I, et al. Experimental investigation on alternative fuel combustion performance using a gas turbine combustor. *Applied Energy*. 2019;238:1530-1542. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.175.
13. Zheng L.K, et al. Effects of Alternative Fuel Properties on Particulate Produced in a Gas Turbine Combustor. *Energy & Fuels*. 2018;32(9):9883-9897. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01442.
14. Esclapez L, et al. Fuel effects on lean blow-out in a realistic gas turbine combustor. *Combustion and Flame*. 2017;181:82-99. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.02.035.
15. Batrameev VA, Ilyasov LV. Mathematical model of the analyzer of the lowest volumetric heat of combustion of gaseous fuels. *Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT-23: Sat. Proceedings of the 23 International scientific conf*. 2011;12:124.
16. Batrameyev VA, Varlamov AP, Ilyasov LV. A Laboratory Analyzer of Gases Low Volumetric Combustion Heat. *Oil & Gas Technologies*. 2012;79(2).
17. Madhlopa A. Gas Turbine Fuels and Fuel Systems. In *Principles of Solar Gas Turbines for Electricity Generation. Green Energy and Technology*. New York: Springer. 2018. pp. 27-49.
18. Liu JL. and Dumitrescu CE. Numerical Investigation of Methane Number and Wobbe Index Effects in Lean-Burn Natural Gas Spark-Ignition Combustion. *Energy & Fuels*. 2019;33(5):4564-4574. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b04463.
19. Shaker M., Sundfor E., Farine G., C. et al. Design and Optimization of a Low Power and Fast Response Viscometer Used for Determination of the Natural Gas Wobbe Index. *Ieee Sensors Journal*. 2019;19(23):10999-11006. doi: 10.1109/jsen.2019.2928479.
20. Roy PS, Ryu C and Park CS. Predicting Wobbe Index and methane number of a renewable natural gas by the measurement of simple physical properties. *Fuel*. 2018;224:121-127. doi: 10.1016/j.fuel.2018.03.074.

Authors of the publication

George E. Marin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. JSC "Tatenergo" branch "Kazan CHP-2".

Boris M. Osipov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. JSC "Tatenergo" branch "Kazan CHP-2".

Pietro Zunino – University of Genova, Genova, Italy.

Dmitrii I. Mendelev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

15 октября 2020г.



КАЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ МАЛЫХ МОЩНОСТЕЙ В РОССИИ

В.А. Петрущенко, И.А. Коршакова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

ORCHID*: <https://orcid.org/0000-0002-9980-5356>, pva38@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Выполнить обзор источников информации по состоянию тепловой энергетики малых мощностей в России при единичной мощности паротурбинных, газотурбинных и газопоршневых агрегатов менее 25 МВт. Оценить источники информации авторов публикаций, приводящих статистику для объектов малой энергетики. Произвести оценку состояния малой энергетики России на основе конкретного перечня объектов, ведущегося авторами за последние 25 лет. Рассмотреть производителей и характеристики агрегатов разных типов, а также схемы интегрирования агрегатов в тепловые схемы существующих источников. МЕТОДЫ. Определение статистических показателей объектов малой энергетики, представленных в табличной форме в программе Excel, производится на основе встроенных функций этой программы. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассмотрены производители и характеристики современных агрегатов на базе паровых турбин. Приведены применяемые на практике схемы интеграции противодавленческих паровых турбогенераторов в тепловые схемы существующих источников тепла. Рассмотрены российские и зарубежные производители и характеристики электроагрегатов на базе газовых турбин, двигателей внутреннего сгорания, работающих по циклу Отто. Приведены тепловые схемы газотурбинных и газопоршневых агрегатов, производящих как электрическую, так и тепловую энергию. Выполнен статистический анализ перечня мини-ТЭЦ (ТЭС), составленного авторами. Определено количество станций разного типа, их распределение по общей мощности, регионам, отраслям, годам ввода в работу. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Показано, что в структуре малой тепловой энергетики определяющую роль играют газотурбинные и газопоршневые установки, общая мощность которых достигает 80%. Количественные показатели - общее число станций объектов малой энергетики около 1500 штук и общая электрическая мощность более 18 ГВт позволяют получить представление о значимой роли малой тепловой энергетики в России. Рассмотрены также количественные показатели по солнечным и ветровым электростанциям в стране.

Ключевые слова: паротурбинные, газотурбинные, газопоршневые установки, схемы интегрирования, перечень мини-ТЭЦ (ТЭС), статистика.

Для цитирования: Петрущенко В.А., Коршакова И.А. Качественный и количественный анализ тепловой энергетики малых мощностей в России // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 52-70. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-52-70.

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF SMALL-SCALE THERMAL ENERGY IN RUSSIA

VA. Petrushchenkov, IA. Korshakova

Sankt-Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
ORCHID*: <https://orcid.org/0000-0002-9980-5356>, pva38@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Perform a review of information sources on the state of small-capacity thermal power in Russia when the unit capacity of steam turbine, gas turbine and gas piston units is less than 25 MW. Evaluate the information sources of the authors of publications that provide statistics for small-scale energy facilities. Make an assessment of the state of small-scale energy in

Russia based on a specific list of objects maintained by the authors over the past 25 years. Consider the manufacturers and characteristics of different types of aggregates, as well as the schemes for integrating aggregates into the thermal schemes of existing sources. **METHODS.** Statistical indicators of small-scale energy facilities presented in tabular form in Excel are determined based on the built-in functions of this program. **RESULTS.** The production and characteristics of modern units based on steam turbines are considered. Practical schemes for integrating counter-pressure steam turbo generators into the thermal schemes of existing heat sources are presented. Russian and foreign manufacturers and characteristics of electric units based on gas turbines and internal combustion engines operating on the Otto cycle are considered. Thermal diagrams of gas-turbine and gas-piston units producing both electric and thermal energy are given. A statistical analysis of the list of small-scale cogeneration and power plants of simple cycle compiled by the authors is performed. The number of stations of different types, their distribution by total capacity, regions, industries, and years of commissioning are determined. **CONCLUSION.** It is shown that gas-turbine and gas-piston installations with a total capacity of up to 80% play a decisive role in the structure of small thermal energy. Quantitative indicators - the total number of stations of small-scale power facilities is about 1500 units and the total electric capacity is more than 18 GW allow us to get an idea of the significant role of small-scale heat power in Russia. Quantitative indicators for solar and wind power plants in the country are also considered.

Keywords: steam turbine, gas turbine, gas piston installations, integration schemes, list of small-scale thermal power plants (CHP), statistics.

Благодарности: Авторы выражают благодарность инженерам Рыкову М.С. и Долгополову А.В. за их вклад в работу по сбору и структурированию первичного материала для Перечня мини-ТЭЦ (ТЭС).

For citation: Petrushchenkov VA, Korshakova IA. Qualitative and quantitative analysis of small-scale thermal energy in Russia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):52-70. doi:10.30724/1998-9903-2020-5-52-70.

Введение и литературный обзор

Тепловая энергетика малых мощностей (малая энергетика) сформировалась в последние 20-25 лет. Для производства электрической и тепловой энергии в стационарной энергетике используются, в основном, установки традиционного типа: паровые турбины, газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания.

Ее появлению предшествовал ряд благоприятных факторов. К концу 19 века в разных областях машиностроения удалось создать типоразмерные ряды электроагрегатов мощностью в десятки, сотни и тысячи киловатт, имеющих достаточно высокие значения к.п.д. простого цикла на уровне 20...40%, коэффициента использования топлива при когенерации 80...90%, общего ресурса работы 100...200 тысяч часов, при их высокой автоматизации, приемлемой стоимости, низкой себестоимости электрической и тепловой энергии. Конкуренция между разными видами оборудования, высокие тарифы на сетевую электроэнергию, отсутствие альтернативы в отдаленных регионах также способствовали росту числа станций малой мощности. Появились двигатели, работающие на разных видах газообразных и жидких топлив, что также способствовало развитию малой энергетики.

В нашей стране изменение структуры экономики в 90-е годы, необходимость обновления парка оборудования в большой и средней энергетике также заставили серьезно относиться к возможности появления и развития малой энергетики [1]. Была произведена конверсия военно-промышленного комплекса, потерявшего в значительной степени рынок сбыта своей машиностроительной продукции. Транспортные двигатели для морских судов, самолетов и вертолетов начали использовать для создания агрегатов, работающих в стационарной энергетике. Законодательные акты, предусматривающие прогрессирующие с течением времени штрафы за сжигание в факелах попутного нефтяного газа, заставили нефтедобывающие компании строить станции, использующие его для производства электроэнергии. Малую энергетику, как правило, связывают с когенерацией [2-6].

В 2011 г. ОАО ЭНИН им. Г. М. Кржижановского разработал "Программу модернизации электроэнергетики России до 2020 г." В ее состав входила подпрограмма

“Разработка и освоение инновационных технологий и оборудования для модернизации электроэнергетики России”. Она предполагала использование мирового опыта развития передовых технологий в теплоэнергетике. Рекомендовались к применению на мини- и микро-ТЭЦ блочные ГТУ, ПТУ, в том числе винтовые расширители пара и машины роторные объемного типа (ПРОМ), а также газопоршневые агрегаты, когенерационные установки на базе топливных элементов. К сожалению, в следующей редакции программы модернизации электроэнергетики на период до 2030 г. объектам малой энергетики на базе тепловых двигателей разного вида такого детального внимания уже не уделялось.

В период с 2005 по 2013 г. в России функционировало “Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике” под руководством Кожуховского И.С.. В соответствии с его перспективными планами до 2030 г. предлагался вариант замены выводимого из работы оборудования средней и большой энергетики на объекты малой энергетики общей мощностью до 50 ГВт, что соответствует 30% общей мощности тепловых электростанций. По инициативе агентства была создана Технологическая платформа “Малая распределенная энергетика”. С 2013 г. по настоящее время действует Некоммерческое партнерство “Распределенная Энергетика” под руководством Новоселовой О.А. В последние годы под эгидой этих организаций проводятся Всероссийские конференции на тему развития распределенной энергетики в России. В программной статье Новоселовой О.А. [7], а также в [8, 9] обсуждаются основные тенденции последних лет в этой области: декарбонизация, децентрализация и цифровизация.

В последние годы в Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г. распределенная энергетика стала связываться с развитием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в первую очередь ветровых и солнечных электростанций. Предполагается к 2035 г. доведение общей мощности ВИЭ до 25 ГВт, в том числе для оптового рынка до 15 ГВт, для розничного рынка, островных систем и микрогенерации до 10 ГВт. Механизм реализации – в рамках Договоров о предоставлении мощности (ДПМ). Существуют две программы ДПМ: ВИЭ 1.0 – до 2024 г. и ДПМ ВИЭ 2.0 – с 2025 по 2035 г. В рамках первой программы поддержки ВИЭ, рассчитанной на реализацию до 2024 года, инвесторы в ветрогенерацию обязаны обеспечить уровень локализации оборудования ветровых энергоустановок (ВЭУ) не менее 65%. В рамках второй программы поддержки ВИЭ на период 2025–2035 гг. обсуждается ужесточение требований к локализации вводимых ВЭУ до 90%. На текущий момент введены в работу 120 объектов, работающих на основе солнечных и ветровых электростанций, имеющих общую мощность 2 ГВт, или 1,2% от мощности тепловых электростанций.

Поэтому представляет интерес оценка стихийных достижений и состояния малой тепловой энергетики на текущий момент. В настоящей статье приведены результаты качественного и количественного анализа объектов малой энергетики в России в виде тепловых электростанций простого цикла и ТЭЦ с агрегатами единичной мощности до 25 МВт. За основу взят Перечень мини-ТЭЦ (ТЭС), периодически пополнявшийся одним из авторов статьи в течение 20 лет. Последние редакции Перечня по состоянию на май 2020 г. разработаны Коршаковой И. А. и размещены на сайте www.twirpx.com [10, 11] в файлах разного формата с разной степенью удобства использования. Встроенные средства *Excel* позволили выполнить статистическую обработку характеристик объектов.

Достоинством Перечня является конкретная информация по объектам с указанием, как правило, места расположения, названия предприятия, состава оборудования, года ввода в работу. В состав Перечня не включались дизель-генераторные установки, которых во много раз больше, чем двигателей другого типа (по нашим оценкам более 50000). Кроме того, они нередко выполняют функцию резервных агрегатов без когенерации, поэтому их учет, во-первых, не слишком интересен, во-вторых, представляет большие трудности.

Следует отметить, что аналогичный и даже более подробный учет объектов малой энергетики ведется Агентством «Бизнес Интернэшнл» (АБИ), г. Пермь [12]. Это исследовательская консалтинговая компания, выполняющая работы для развития предприятий и территорий, продвижения продукции. Она была основана 12 апреля 2001 года для проведения экономических исследований и разработок и до 2004 г. называлась “НЭЦИР” - “Негосударственный Экономический Центр Исследований и Разработок”.

Основные направления исследовательских коммерческих продуктов АБИ, представляющие интерес для рассматриваемой в статье теме, следующие: парогазовые электростанции и установки; газотурбинные электростанции и установки (без парогазовых); газопоршневые электростанции и установки; паротурбинные установки в России; ветровые, солнечные и гидравлические электростанции в России; характеристики газопоршневых и газотурбинных электростанций.

Свои отчеты АБИ представляет в виде номерных выпусков, Базы сведений, Обзора, Информационно-аналитического обзора, Отчета об исследовании, Справочника и т.д. по одной из указанных выше тем на определенный период. Эти документы выпускались в период с 2010 по 2020 г. и имели стоимость только по одному виду оборудования от нескольких десятков до ста и более тысяч рублей.

Насколько нам известно, анализ статистических данных по собранной фирмой информации не публикуется в открытой печати. Возможно, что он и не проводится АБИ в том объеме, который выполнен в настоящей статье.

Известен также аналитический обзор (доклад) МШУ “Сколково” по теме “Распределенная энергетика в России: потенциал развития”, опубликованный в 2018 г. [13]. Авторы доклада сообщают, что по данным Росстата, в России в 2016 г. работало 36 тысяч электростанций мощностью не более 25 МВт суммарной мощностью 13,0 ГВт. Примерно 8,5 ГВт мощности размещается в зоне децентрализованного энергоснабжения. Только 1 тысяча объектов имеет мощность более 500 кВт, а средняя мощность еще почти 35 тысяч децентрализованных электростанций составляет в среднем около 30 кВт. Очевидно, в этом обзоре учитываются дизель-генераторные установки.

В [14] авторы со ссылкой на маркетинговые исследования Информационного агентства «INFOLine» приводят разные оценки общей мощности объектов малой тепловой энергетики в пределах от 3 до 17 ГВт.

Столь различные величины даже общих показателей малой энергетики повышают актуальность конкретизации объектов, а также ясного и прозрачного определения их характеристик, поддающихся контролю и проверке.

Проблемы терминологии и законодательной базы

Отсутствие должного внимания со стороны законодательной власти к факту существования малой энергетики в России приводит к тому, что многие термины являются общеупотребимыми, но не имеющими нормативного определения. Например, до сих пор нет ясности, что такое мини-ТЭЦ (ТЭС), как с точки зрения предельной мощности энергоисточника, так и его территориальных границ [15]. В важнейшем нормативном документе ГОСТ 26691-85 «Теплоэнергетика. Термины и определения» отсутствуют такие понятия как: мини-ТЭЦ (ТЭС), газопоршневые электростанции ГПЭС; БиоТЭС – станции, работающие на пеллетах, гранулах, отходах деревообработки; биогазовые ТЭС – станции, работающие на газах метантенков.

В связи с этим имеются определенные трудности при проектировании и согласовании проектной документации объектов малой энергетики. Существующий основополагающий действующий документ ВНТП 81 «Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций» применим для паротурбинных станций с турбоагрегатами единичной мощностью 50 МВт и выше. При актуализации СНиП II-58-75 «Электростанции тепловые» (СП 90.13330.2012) произошло существенное снижение нижней границы применимости этого документа по единичной мощности паротурбинных и газотурбинных агрегатов с 25 МВт до 1 МВт. Такой подход представляется очень формальным и не слишком удачным, так как затруднительно на станциях малой мощности иметь все системы и выполнять требования, которые предусмотрены для больших станций.

При проектировании новых котельных в СП 89.13330.2012 «Котельные установки» в п. 4.9 рекомендуется установка паровых турбогенераторов для котельных с паровыми и пароводогрейными котлами, а также газотурбинных или дизельных установок в водогрейных котельных при общей мощности котельной более 10 МВт. В п. 4.15 уже говорится о газопоршневых агрегатах, которые принципиально отличаются от дизельных установок, по виду топлива, виду цикла, способу воспламенения топливовоздушной смеси.

При этом приводимые указания написаны весьма формально и противоречиво. Говорится о напряжении электрогенераторов 0,4 кВ, тогда как на практике при установке

электрогенерирующих агрегатов часто используют среднее напряжение 6,3 и 10,5 кВ с выдачей вырабатываемой электроэнергии на существующие трансформаторные подстанции среднего напряжения. Проектирование этих установок предлагается производить по ВНТП-81 «Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций» и НТПД-90 «Нормы технологического проектирования дизельных электростанций». Но первый документ применим только для паровых турбоустановок единичной мощностью более 50 МВт, второй документ - только для дизельных установок, но никак не для газопоршневых агрегатов. В связи с отсутствием нормативной документации для объектов малой энергетики предлагается разработка специальных технических условий (СП 89.13330.2012, п. 4.9).

Состояние малой тепловой энергетики в России

Следует отметить, что несмотря на отсутствие профильной законодательной базы в нашей стране для малой энергетики, так называемые мини-ТЭЦ (ТЭС) получили широкое распространение в России. В названном Перечне на май 2020 г. насчитывается около 1500 объектов электрогенерации (кроме дизельных установок) общей мощностью около 18 ГВт, что составляет примерно 11% от установленной мощности всех тепловых электростанций России.

Темпы роста численности объектов малой тепловой энергетики говорят о жизненной необходимости ее применения в различных сферах и отраслях. Очевидно, что во многих случаях она выдерживает конкуренцию с большой энергетикой и будет существовать и развиваться, несмотря на трудности и препятствия. В этом смысле весьма показательной является ее судьба в современных зарубежных странах, где ее доля по установленной мощности достигает десятков процентов. По данным Российского энергетического агентства на 2014 г. в США насчитывалось 12 млн. энергоисточников мощностью менее 60 МВт, общая мощность равнялась 220 ГВт, ежегодно вводилось в работу около 5 ГВт [16]. Интересно отметить, что по прогнозу *Navigant Research* 2018 г. ввод мощностей распределенной энергетики в мире начал превышать ввод централизованных мощностей [13]. Можно ожидать, что с течением времени малая энергетика займет свою законную и естественную нишу и в нашей стране.

В настоящей статье приводится информация об отечественных и зарубежных производителях электрогенерирующего оборудования, обсуждаются схемы интеграции вновь вводимого оборудования в тепловые схемы котельных, при которых строятся машинные залы. Выполнен статистический анализ объектов Перечня мини-ТЭЦ (ТЭС) по разным признакам: виду двигателей, динамике ввода мощностей в работу в рассматриваемый период длительностью 25 лет, отраслевому и региональному распределению энергоисточников.

Современные технологии производства электрической и тепловой энергии на базе тепловых двигателей

Рассмотрим производителей основного оборудования для мини-ТЭЦ (ТЭС). В первую очередь интересна российская продукция, но некоторые виды оборудования выпускают только зарубежные предприятия.

Паровые турбины

В настоящее время из отечественных производителей паровые турбины выпускают Ленинградский металлический завод (25-1200 МВт), Уральский турбинный завод (30-300 МВт), ОАО «Калужский турбинный завод» (0,5-80 МВт), ОАО «Пролетарский завод» (0,35-4 МВт) (СПб), АО «Энерготех» - до 6 МВт (СПб), ГК «Турбопар» – до 1 МВт (Смоленск).

ОАО «Кировский завод», АО «Невский завод» (РЭП Холдинг) в последние десятилетия производят паровые турбины единичными агрегатами.

Зарубежные производители паровых турбин: ОАО «Турбоатом», г. Харьков (1-1100 МВт), Украина; Чехия - АО «*PBS Energo*» (0,1-30 МВт), Велка Битеш; *EKOL* (1-70 МВт), Брно; *G-team* (0,02-3 МВт), Пльзень; ООО «УГК-Холдинг» (Екатеринбург) является дилером фирмы *G-team* в России; Германия – фирма «*Siemens*» (0,075-1900 МВт); *MAN Diesel&Turbo SE* (1,5-40 МВт), Гамбург; Швейцария - *Turbomach SA*, паровые турбины *B + V Industrietechnik GmbH* (3-30 МВт, Германия); США, Германия, Франция – *Dresser Rand* (0,1-100 МВт); США – *General Electric Aero Energy* (1-100 МВт); Япония – *Elliott Group*

принадлежит японской компании *Ebara Corporation* (0,015-100 МВт); Китай – (1-60 и более МВт).

Большинство паровых турбин являются многоступенчатыми, осевыми либо одноступенчатыми радиальными. Находят применение противодавленческие паровинтовые агрегаты мощностью до 1 МВт (*Wintoo*, СПб; *FEG Ltd, Gateshead*, Великобритания; *Electra Therm*, США). Оригинальными являются одновенечные турбины с повторным подводом пара к группам каналов рабочего колеса при движении пара в тангенциальном направлении («Констар», Украина; «Ютрон», Беларусь), либо в меридиональной плоскости («Элна», Екатеринбург). Их мощность составляет 30-350 кВт, турбины противодавленческого типа. Паровые расширители объемного типа ПРОМ мощностью от 50 кВт до 600 кВт, к сожалению, распространения не получили, после выпуска нескольких агрегатов их производство прекращено. Прочее малоизвестное оборудование здесь не рассматривается.

Схемы интеграции паровых противодавленческих турбоагрегатов в схемы тепловых источников

Как правило, машинные залы с паровыми турбогенераторами строятся при существующих котельных, в составе которых имеются паровые котлы с давлением насыщенного или перегретого пара 14 ата и выше. В [17] рассмотрены возможные схемы интеграции паровых турбин в тепловые схемы котельных. Показано, что для открытых систем теплоснабжения с атмосферным деаэратором наиболее удачной является схема, приведенная на рис. 1. Синим цветом показано вновь вводимое оборудование, размещаемое в машинном зале мини-ТЭЦ.

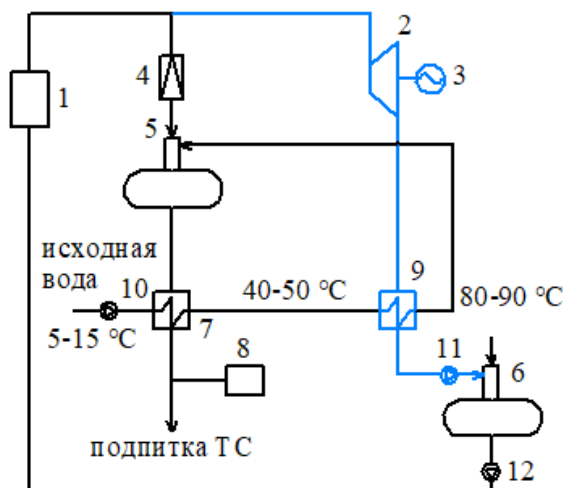


Рис. 1. Схема интеграции парового турбогенератора для открытой системы теплоснабжения. 1 – паровой котел, 2 – паровая турбина, 3 – электрогенератор, 4 – редукционно-охладительная установка котельной, 5 – подпиточный деаэратор сетевой воды, 6 – питательный деаэратор, 7 – охладитель деаэрированной подпиточной воды, 8 – аккумуляторный бак горячей воды, 9 – пароводяной подогреватель машзала для подогрева сырой воды, 10 – насос сырой воды, 11 – конденсатный насос, 12 – питательный насос. ТС – тепловая сеть.

Выработка электроэнергии производится на базе нагрузки горячего водоснабжения. Так как в открытых системах теплоснабжения используются баки-аккумуляторы горячей воды, то тепловая мощность системы приготовления подпиточной воды равномерна в течение суток. Это позволяет вырабатывать электрическую энергию также при постоянной мощности.

Пар с выхлопа паровой турбины 2 поступает на подогреватель подпиточной воды 9 (см. рис. 1). Поток подпиточной воды подается на них после охладителей деаэрированной воды 7. Фильтры ХВО в схеме не показаны, так как их наличие зависит от жесткости исходной сырой воды. Противодавление турбины обычно равно 0,12-0,3 МПа абс. Конденсат после подогревателя должен подаваться конденсатными насосами 11 в питательный деаэратор 6, расположенный на высокой вертикальной отметке. Конденсатные насосы также устанавливаются в машзале вблизи теплообменника 9 и парового турбогенератора.

Подпиточная вода после охладителя деаэрированной воды 7 имеет температуру на уровне 40...50°C, на выходе из пароводяного подогревателя 9 на уровне 80...90°C.

Площадь поверхности теплообмена теплообменника машзала выбирается, исходя из температурного напора между паром и водой и расхода потока подпиточной воды.

Подача греющего пара в деаэраторы при давлении выхлопного пара 0,12 МПа абс. сохраняется в проектном варианте для котельной от РОУ. При противодавлении 0,2-0,3 МПа абс. поток греющего пара в подпиточный деаэратор 5 и питательный деаэратор 6 может подаваться также с выхлопа турбины.

Приведенная схема не требует реконструкции котельной, кроме врезок трубопроводов. В этом случае при необходимости имеется возможность вернуться к работе по проектной тепловой схеме котельной. Такая схема может обеспечить высокую электрическую мощность мини-ТЭЦ.

Для закрытых систем теплоснабжения универсальным вариантом является схема, приведенная на рис. 2.

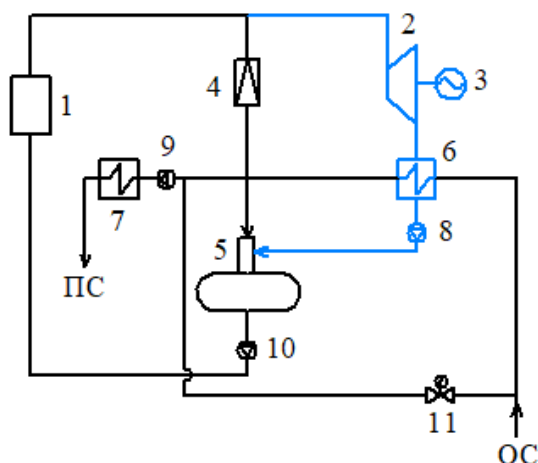


Рис. 2. Тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной для закрытой системы теплоснабжения. 1 – паровой котел, 2 – паровая турбина, 3 – электрогенератор, 4 – редукционно-охладительная установка котельной, 5 – питательный деаэратор, 6 – пароводяной подогреватель машзала для предварительного подогрева обратной сетевой воды, 7 – водогрейный котел, 8 – конденсатный насос, 9 – сетевой насос, 10 – питательный насос, 11 – регулятор расхода потока обратной сетевой воды в байпасной линии. ОС – обратная линия тепловой сети, ПС – прямая линия тепловой сети.

Часть или весь поток обратной сетевой воды предварительно подогревается выхлопным паром паровой турбины в подогревателе 6. При необходимости сетевая вода догревается в водогрейном котле до температуры, определяемой температурным графиком регулирования сезонной нагрузки. Последовательное соединение пароводяного подогревателя машзала и водогрейного котла позволяет обеспечить проектный температурный график котельной и иметь высокую выработку электрической мощности в базовой части графика тепловой нагрузки.

Представляет интерес оценка электрической мощности, вырабатываемой на тепловом потреблении. Ориентиром необходимой мощности являются собственные нужды котельной по электропотреблению. Удельный расход электрической энергии в расчете на присоединенную тепловую нагрузку определяется в основном мощностью сетевых насосов и составляет величину в среднем около $20 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{Гкал} = 0,0172 \text{ кВт(э)} / \text{кВт(т)}$.

Доля расчетной среднечасовой нагрузки ГВС обычно находится на уровне 0,35 от общей тепловой нагрузки котельной. В этом случае для покрытия собственных нужд при выработке электроэнергии на нагрузке ГВС требуется $0,0172 / 0,35 = 0,0491 \text{ кВт(э)} / \text{кВт(т)}$, на нагрузке отопления - $0,0172 / 0,65 = 0,0265 \text{ кВт(э)} / \text{кВт(т)}$.

В [18] определены значения удельной выработки для рассмотренных выше схем. Их численное значение при давлении насыщенного свежего пара 1,3 МПа абс. и величины противодавления 0,12 МПа абс. составляют для схемы на рис. 1 при работе на нагрузке ГВС $0,122 \text{ кВт(э)} / \text{кВт(т)}$, для схемы на рис. 2 при работе на нагрузке отопления и отсутствии расхода воды в байпасной линии $0,0530 \text{ кВт(э)} / \text{кВт(т)}$ для температурного графика 150-70°C и $0,142 \text{ кВт(э)} / \text{кВт(т)}$ для температурного графика 95-70°C. Отсюда видно, что выработка электрической энергии на мини-ТЭЦ может значительно превышать потребность в собственных нуждах котельной. Для производственно-отопительной котельной возможно обеспечение электроэнергией не только котельной, но и оборудования предприятия, что существенно снижает срок окупаемости мини-ТЭЦ.

Для регулирования мощности парового турбогенератора в течение года используются следующие схемные и режимные способы регулирования мощности мини-ТЭЦ: изменение числа работающих пароводяных теплообменников, изменение расхода воды через эти теплообменники за счет регуляторов в байпасных линиях, изменение противодавления турбины в разрешенном диапазоне [19]. Самым универсальным, точным и надежным, очевидно, является второй способ регулирования.

При определении себестоимости электрической энергии на мини-ТЭЦ с противодавленческим паровым турбогенератором встает вопрос по определению дополнительных затрат топлива на энергоисточнике. При полезном использовании тепла систем охлаждения генератора, маслоохлаждения, конденсаторов пара уплотнений их величина однозначно определяется удельным показателем $\Delta b_3 = 123/\eta_{\text{кот}}$, г у.т./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$), где $\eta_{\text{кот}}$ – коэффициент использования топлива паровой части котельной, который для современной котельной находится на уровне 0,85 [20].

Удельный расход топлива на выработанный $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии в этом случае составляет 145 г у.т./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$). Следует отметить, что эта величина не зависит от внутреннего к.п.д. паровой турбины. Поэтому при работе на частичных режимах при малой мощности парового турбогенератора, несмотря на значительное уменьшение внутреннего к.п.д. турбины, экономика производства электроэнергии определяется в соответствии с зависимостью к.п.д. паровых котлов от их нагрузки и собственными нуждами котельной по пару.

Относительное увеличение расхода топлива на котельной при вводе в работу противодавленческого парового турбогенератора пропорционально отношению среднегодовых значений его электрической мощности и тепловой нагрузки котельной. С учетом приведенных выше соотношений увеличение расхода топлива в котельной в связи с выработкой электроэнергии противодавленческим паровым турбогенератором не превышает 3%.

Газотурбинные агрегаты

Второй широко применяемый вид оборудования в малой энергетике – газотурбинные установки.

Различают газотурбинные электростанции простого цикла с выработкой только электроэнергии; циклы с повышенной эффективностью за счет регенерации тепла, промежуточного охлаждения при сжатии и промежуточного подогрева при расширении; энергоустановки когенерационного цикла при производстве электрической и тепловой энергии в виде потока пара, горячей воды, или потока пара и горячей воды; комбинированного цикла, в котором наряду с ГТУ используются и паровые турбоустановки, работающие на паре, полученном в котлах-утилизаторах ГТУ, либо в энергетических котлах; циклы со смешением дымовых газов и паров воды – контактные парогазовые установки; ГТУ с поршневыми камерами сгорания (свободнопоршневые двигатели).

Газотурбинная установка простого цикла работает по открытому циклу Брайтона. Атмосферный воздух сжимается в адиабатном процессе в компрессоре, подается в камеру сгорания под давлением, туда же подается топливо (природный газ, попутный нефтяной газ, биогаз, дизельное топливо) под еще большим давлением для смешения воздуха с топливным газом либо организации распыла жидкого топлива. Происходит сжигание топлива в пламени с образованием продуктов сгорания при температуре порядка 2000°C . Температура газов на входе в рабочие ступени находится для ГТУ разных производителей обычно от 900 до 1400°C . Для обеспечения необходимой температуры газов для входа в ГТУ производится смешение дымовых газов факела горения с балластным сжатым воздухом. В связи с этим коэффициент избытка воздуха для турбин с низким к.п.д. достигает 3-5 и более. Затраты энергии на сжатие балластного воздуха являются причиной снижения к.п.д. ГТУ, работающей по циклу Брайтона.

Температура уходящих газов ГТУ находится в диапазоне от 400 до 600°C . К.п.д. простого цикла приводится для условий ГОСТ Р 52200-2004 (ИСО 3977-2: 1997) "Установки газотурбинные. Нормальные условия и номинальные показатели": температуре наружного воздуха $+15^\circ\text{C}$, давлении наружного воздуха 760 мм рт. ст., или 101,3 кПа, влажности воздуха 60% при использовании жидкого топлива с калорийной способностью 42000 кДж/кг или газообразного топлива (100 % метан) - 50000 кДж/кг.

К.п.д. ГТУ простого цикла находится в пределах от 20 до 43,9%. Его величина зависит от уровня мощности, параметров рабочего тела на входе в первую ступень,

производителя ГТУ. Номинальная мощность выпускаемых ГТУ сегодня изменяется в широких пределах: от 15 кВт до 571 МВт. В малой энергетике мощность ГТУ находится в пределах от 15 кВт до 25 МВт, к.п.д. – от 20 до 35%.

Российские производители ГТУ: Пермский машиностроительный завод, Авиадвигатель, АО «Искра-Энергетика», ОАО НПО «Искра» – (2,5-25 МВт); ОАО «Сатурн-Газовые турбины» (в настоящее время ОАО «ОДК-ГТ») – (2,5-25 МВт); АО «Климов»(СПб) – 1,25-2,5 МВт; ОАО «Калужский двигатель» (75 кВт, 100 кВт, 200 кВт); ОАО «Пролетарский завод» (1,5-1,8 МВт); Уральский турбинный завод (Екатеринбург) предлагает изготовление и поставку газотурбинных установок мощностью 6, 16 и 25 МВт; «ГТ-ТЭЦ Энерго» – 9 МВт; ФГУП НПП «Мотор», г. Уфа, производит ГТУ мощностью 10 МВт; ОАО «Кузнецов», г. Самара, выпускает ГТУ типа НК-14Э - 10 МВт, НК-37 – 25 МВт; ФГУП НППГ «Салют», г. Москва, предлагает изготовление ГТУ мощностью от 1 до 20 МВт.

Производители ближнего зарубежья: Украина - Мотор Сич (предлагают изготовить ГТУ мощностью 1-8 МВт, фактически освоены модель энергопоезда ПАЭС-2500 и ГТЭ-6 МВт), г. Запорожье; «Зоря Машпроект» (2,5-25 МВт), г. Николаев, среди них ГТУ простого цикла, ГТУ с когенерацией (пароводяными и водяными котлами-утилизаторами), парогазовые бинарные установки или комбинированный цикл: циклы ГТУ и паротурбинной установки, работающей на паре котла-утилизатора, контактные или молярные ПГУ STIG и «Водолей».

Производители дальнего зарубежья: США – *Solar Turbines* (1,21-21,7 МВт); *GE Energy* (2-100 МВт); *Rolls-Royce* (3,9-28,7 МВт); Германия – *Siemens Industrial Turbomachinery* (5-47 МВт); *Siemens Westinghouse* (49,5-375 МВт); *MAN Diesel&Turbo* (6,2-25,5 МВт); Канада - *Pratt&Whitney Power Systems* (0,68-25,5 МВт); Голландия – *OPRA Turbines BV* (1,8-2 МВт). Производители микротурбин – *Capstone Turbine Corporation* (15-1000 кВт). Основным дилером и генподрядчиком по строительству электростанций на основе микротурбин Capstone в России до 2017 г. являлась фирма «БПЦ-Энергетические системы» (г. Москва). В г. Тутаев Ярославской области эта компания построила завод по сборке блочных электростанций на основе турбоагрегатов Capstone с торговой маркой *ENEX*. Кроме того, этот завод производит блочные электростанции *ENEX-2000* мощностью 2000 кВт на базе ГТУ фирмы *Dresser Rand* типа *KG2-3E* - 1,9 МВт; *KG2-3G* - 2,0 МВт.

Микротурбины выпускают также итальянская фирма *Turbec*-100 кВт, американская фирма *Elliott (Calnetix)* 60-100 кВт, американская фирма *Flex Energy* мощностью 250 и 333 кВт, ООО НТЦ «Микротурбинные технологии», С.-Петербург, 100 кВт.

Типовая схема для микротурбин с регенерацией тепла и когенерацией приведена на рис. 3.

Схема ГТУ-ТЭЦ с водяным котлом-утилизатором показана на рис. 4. Вместо водяного котла-утилизатора могут использоваться паровой котел-утилизатор, либо паровой котел-утилизатор и газоводяной подогреватель.

Применяются также схемы комбинированного цикла ГТУ с паровым котлом-утилизатором одного или нескольких давлений пара и ПТУ, схемы с низконапорным парогенератором (сбросная схема), контактного типа *STIG* и «Водолей», в которых рабочим телом в ГТУ является смесь дымовых газов и паров воды.

Газопоршневые агрегаты

Широкое распространение при строительстве мини-ТЭЦ получили также агрегаты на основе поршневых двигателей внутреннего сгорания.

В РФ на востоке страны и на северных территориях использовались около 50 тыс. электростанций в виде дизель-генераторных установок, работающих как в основном режиме, так и в качестве резервных агрегатов. Дизель-генератор является двигателем внутреннего сгорания и работает по циклу Дизеля (адиабатное расширение и сжатие, изобарный подвод и отвод теплоты). Процесс подвода теплоты происходит при самопроизвольном воспламенении топливовоздушной смеси в процессе ее сжатия. Топливо – дизельное разных марок: арктическое, зимнее, летнее (отличие в вязкости при низких температурах). В названном выше Перечне мини-ТЭЦ (ТЭС) дизель-генераторы не рассматриваются.

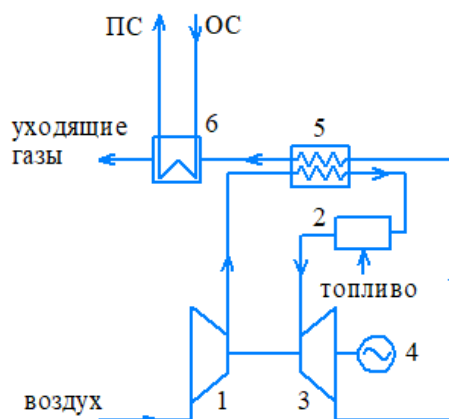


Рис. 3. Типовая схема для микроТЭЦ с регенерацией тепла и подогревом сетевой воды. 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина; 4 – электрогенератор; 5 – регенератор; 6 – теплообменник сетевой воды.

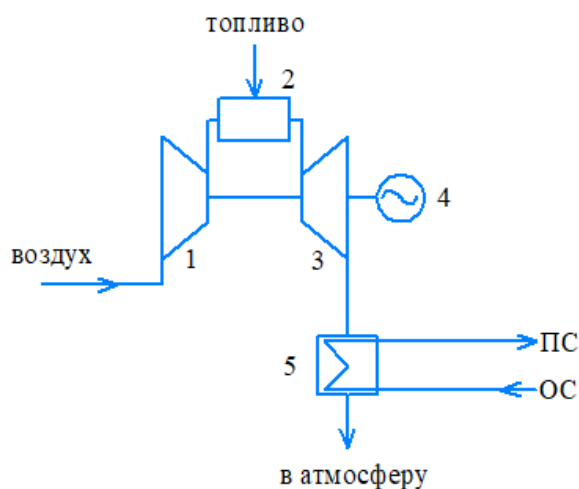


Рис. 4. Схема ГТУ-ТЭЦ с водяным котлом-утилизатором. 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина; 4 – электрический генератор; 5 – водяной котел-утилизатор.

Выработанная дизель-генератором электроэнергия весьма дорогая, но в тех регионах, где нет централизованного электроснабжения, конкурентоспособных вариантов пока нет. Можно улучшить эти показатели за счет производства тепловой энергии, но в большинстве случаев тепловая нагрузка либо отсутствует, либо незначительная.

В последние 20 лет чрезвычайно широкое применение получили газопоршневые агрегаты (ГПА) простого цикла и с утилизацией тепловой энергии. Их двигатели являются двигателями внутреннего сгорания, работающими, в основном, по циклу Отто (адиабатное расширение и сжатие, изобарный отвод тепла, изохорный подвод тепла). Зажигание топливовоздушной смеси производится с помощью искры электрической свечи.

У ГПА имеется множество плюсов.

1. Высокий к.п.д. простого цикла – от 30 до 49%.
2. При утилизации тепловой энергии коэффициент использования топлива может достигать уровня 80-90%.
3. Эти агрегаты имеют высокий ресурс до капремонта порядка 40000-80000 часов и более, общий моторесурс достигает 300000 часов. Особенно высокий ресурс у малооборотных двигателей со скоростью вращения 500 и 750 об/мин.
4. Единичная мощность агрегатов от 20 кВт до 18,3 МВт, хотя большинство производителей выпускает агрегаты от сотен кВт до 2 МВт.
5. Агрегаты небольшой мощности могут размещаться в блочных зданиях, имеющих габариты, которые позволяют осуществлять их перевозки автомобильным и железнодорожным транспортом в собранном виде.
6. При изменении температуры наружного воздуха к.п.д. простого цикла ГПА изменяется не так сильно, как для ГТУ.

7. ГПА могут работать на разных газах: природном газе (магистральный, сжиженный); пропан-бутановых смесях; попутном газе нефтяных скважин; промышленном газе (пиролизный, коксовый), шахтном метане, биогазе и т.д.

8. Для работы ГПА достаточно давления газа на входе 0,3 МПа, то есть, обычно отсутствует необходимость в дожимной компрессорной станции.

В то же время у ГПА есть и минусы.

1. Значительное количество разных систем утилизации тепловой энергии с разными температурами теплоносителя: отвод теплоты от рубашки двигателя, от системы маслоснабжения, от системы турбонаддува, применяемой для агрегатов значительной мощности, от уходящих газов усложняет компоновку станции и ее эксплуатацию.

2. При отсутствии теплового потребителя первых трех систем необходимо предусматривать отвод теплоты с помощью отдельных теплообменных аппаратов, выполняющих роль аварийных охладителей. В результате имеется большой парк различного теплообменного оборудования, появляется необходимость применения незамерзающего теплоносителя (антифриза) с введением промежуточных контуров.

3. В основном, применяются ГПА зарубежного производства в связи с отсутствием широко развитого производства в нашей стране. Для их работы используется дорогостоящее импортное масло. Особенность работы ДВС состоит в том, что при высоких температурах дымовых газов и металлических узлов большое количество масла выгорает, требуется его пополнение в системе маслоснабжения.

4. В итоге, при работе ГПА значительные затраты имеют место на масло, замену свечей зажигания, колец рабочих поршней, масляных и воздушных фильтров, антифриза.

5. Высокое содержание вредных веществ NOx и CO в выхлопных газах, например, в сравнении с газовыми турбинами. В связи с этим нужно предусматривать высокие дымовые трубы, обеспечивающие необходимую степень рассеивания вредных веществ в атмосфере. В отдельных случаях приходится отказываться от этих технологий, если фоновые концентрации превышают предельно допустимые значения концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе.

6. Один из самых главных недостатков ГПА – это требование большинства производителей по длительной работе на мощности не менее 50% номинальной мощности агрегата. Это означает, что при переменном графике работы предприятия по потребляемой электрической мощности необходимо устанавливать агрегаты либо для базовой части нагрузки, либо нужно ставить часть агрегатов малой мощности, что приводит к удорожанию мини-ТЭЦ и к созданию дорогостоящей системы управления работой нескольких агрегатов.

В городах обычно ГПА размещаются в машзалах. Нередко энергоисточник на базе ГПА содержит в своем составе пиковые котлы, которые обеспечивают недостающую тепловую мощность для отпуска тепловой нагрузки энергоисточника завода или муниципального предприятия. Нередко ГПА интегрируют в тепловую схему существующей котельной. Тепловая энергия утилизации ГПА используется для подогрева обратной сетевой воды или приготовления нагрузки ГВС, реже – для выработки технологического пара или сушки каких-либо материалов.

Отечественные производители ГПА. В основном, высокоэффективные газопоршневые агрегаты в широком диапазоне единичных мощностей производятся за рубежом.

В России агрегаты наибольшей мощности в диапазоне 630-1000 кВт производит ОАО «РУМО» (Русские моторы, г. Нижний Новгород), ООО «Конвер» (г. Коломна) – 800-1180 кВт; ОАО «Барнаултрансмаш» (100-315 кВт); АО ФПК «Рыбинсккомплекс» (30-350 кВт); ОАО «ОДК-Газовые турбины» производит пакитирование на базе зарубежных агрегатов *GE Jenbacher*, *MTU*, *Man*, *Caterpillar* блочных установок от 0,5 до 4,3 МВт, либо поставляет газопоршневые агрегаты *Man* мощностью до 18 МВт для установки в машзалах; ООО АРЗ «Синтур-НТ» – мощность агрегатов собственного производства от 75 до 200 кВт, агрегатов мощностью от 200 до 1560 кВт западных производителей.

Зарубежные производители ГПА

За рубежом имеется большое количество производителей ГПА. Приведем основные фирмы с указанием диапазона единичных мощностей агрегатов.

1. *Buderus* (10-1250 кВт), Германия.

2. *Caterpillar* (20-9700 кВт), США.
3. *Cummins* (315-2000 кВт), Великобритания.
4. *EC Power* (4-15,2 кВт), Дания.
5. *Elteco* (3,8-3916 кВт), Словакия. Выполняет пэкидж агрегатов разных производителей, собственные установки фирма не выпускает.
6. *FG Wilson* (10-1000 кВт), Великобритания.
7. *GE Jenbacher* (299-10400 кВт), Австрия. Достигнута эффективность агрегата 49,1%.
8. *Generac Power Systems* (5,6-320 кВт), США.
9. *Guascor* (142,8-1204 кВт), Испания.
10. *Kawasaki* (5200-7800 кВт), Япония. Достигнута эффективность агрегата 48,5%.
11. *Kohler Power Systems* (6,3-668 кВт), США.
12. *KORNUM* (118-3200 кВт), Великобритания.
13. *MaK* (6520 кВт), Германия.
14. *MAN Diesel Turbo* (47-18500 кВт), Германия. Достигнута эффективность агрегата 48,8%.
15. *Mitsubishi* (500-5750 кВт), Япония.
16. *Motorgas* (36-3200 кВт), Чехия. Производится пэкирование на базе агрегатов *Waukesha* и *Man*.
17. *MTU* (116-2145 кВт), Германия.
18. *MWM (Deutz Power Systems)* (400-4500 кВт), Германия.
19. *Perkins* (307-1008 кВт), Великобритания.
20. *Rolls-Royce* (2425-8500 кВт), 46,3% Великобритания. Достигнута эффективность агрегата 46,3%.
21. *Tedom* (6,5-10400 кВт), Чехия. Производится пэкирование на базе агрегатов собственного производства серий *Micro*, *Cento* и серии *Quanto* на базе агрегатов фирмы *Caterpillar*. Достигнута эффективность агрегата 47,0%.
22. *Viessmann* (18-402 кВт), Германия.
23. *Wartsila* (4040-18440 кВт), Финляндия. Достигнута эффективность агрегата 49,0%.
24. *Waukesha* (75-3250 кВт), США.
25. *Yanmar* (5-25 кВт), Япония.

У отечественных ГПА расход масла на угар порядка 1-1,5 г на выработанный кВт·ч, у зарубежных – около 0,3 г/(кВт·ч).

Применяются также двухтопливные двигатели – газодизельные. Около 20% по калорийности используется дизельное топливо в качестве запального, для некоторых двигателей – сырая нефть, остальные 80% – топливный газ, как правило, природный газ.

Двухтопливные электростанции производят следующие западные фирмы.

1. *Niigata Power Systems* (825-5255 кВт), Япония.
2. *Wartsila* (6080-16621 кВт), Финляндия.

Двухтопливные электростанции российского производства.

1. ОАО «Коломенский завод» (1000-1650 кВт).
2. РУМО (800-1000 кВт).
3. «Синтур-НТ» (75-140 кВт).

Типичная тепловая схема интеграции систем охлаждения разного вида для ГПА в существующую систему теплоснабжения приведена на рис. 5.

Роль пиковых или резервных источников тепла выполняют котлы и теплообменное оборудование котельных. В отдельных случаях при мини-ТЭЦ устанавливается аналогичное новое оборудование с целью обеспечить тепловые нагрузки, независимо от работы электрических агрегатов.

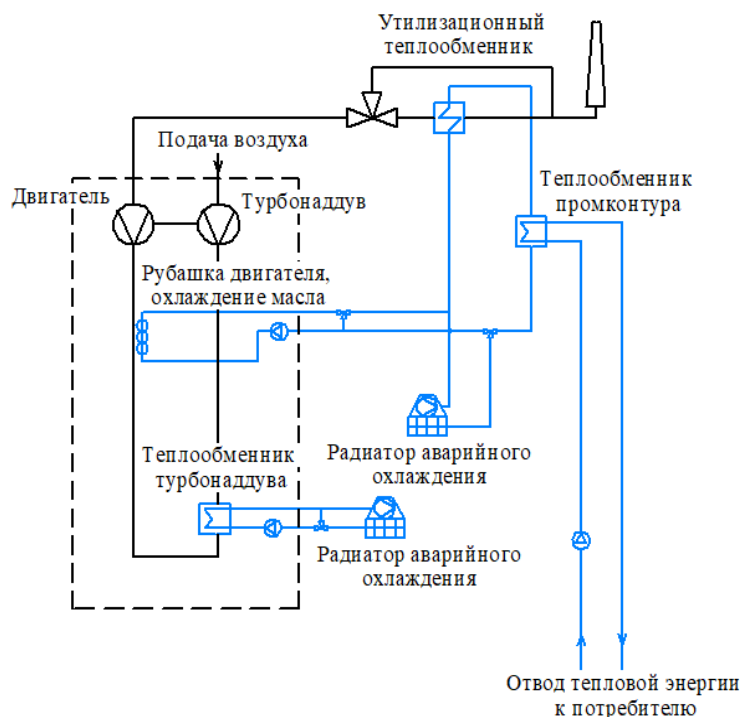


Рис. 5. Тепловая схема газопоршневого агрегата с когенерацией. Полезное использование тепла от рубашки двигателя, систем маслоснабжения, турбонаддува, уходящих газов

Материалы и методы

Разработанный авторами Перечень объектов малой энергетики, введенных в работу за последние 25 лет, требует, во-первых, анализа большого количества объектов по разным признакам с целью их структурирования, во-вторых, сравнения интегральных показателей с объектами большой энергетики. С целью проведения статистического анализа данных Перечня авторам пришлось представить его данные в таблице редактора Excel, встроенные функции которого позволяют легко производить суммирование показателей разных групп станций. Открытый доступ к Перечню позволяет выполнить проверку полученных показателей, а также определить новые характеристики.

Статистический анализ на основе данных Перечня мини-ТЭЦ (ТЭС)

Представляет интерес статистический анализ данных Перечня мини-ТЭЦ (ТЭС) объектов малой энергетики, введенных в работу в период с 1995 г. по май 2020 г. За период длительностью в 25 лет некоторые объекты уже прекратили свое существование. Это необходимо иметь в виду при использовании и анализе данных Перечня.

В Перечне мини-ТЭЦ (ТЭС) на текущий момент насчитывается 1452 объекта малой мощности, генерирующих электрическую энергию, введенных в работу с 1995 года. Несмотря на то, что это объекты малой мощности, в совокупности их общая мощность равна 18 ГВт, что составляет около 11% от установленной мощности всех тепловых электростанций в России. Кроме того, введены в работу 120 объектов, работающих на основе ВИЭ, имеющих общую мощность 2 ГВт, или 1,2% от мощности тепловых электростанций.

Все рассматриваемые энергоисточники разделены по типу оборудования: энергоисточники на базе газотурбинных установок, паротурбинных (в том числе паровинтовых), газопоршневых агрегатов, а также парогазовые установки разного типа, СЭС и ВЭС.

Статистическая обработка данных перечня производилась по следующим признакам.

1. Вид оборудования, количество станций одного вида и их общая мощность: ПГУ, ГТУ, ГПА, ПГУ, отдельно СЭС и ВЭС.
2. Распределение объектов энергетики по федеральным округам России: Дальневосточный, Приволжский, Северо-Западный, Северо-Кавказский, Сибирский, Уральский, Центральный, Южный.

3. Распределение объектов энергетики по отраслям промышленности и другим сферам деятельности: коммунальное хозяйство, промышленность, тепличное хозяйство, топливно-добывающие отрасли, электрогенерирующие компании.

4. Динамика ввода в работу мощностей по пятилеткам в период с 1995 по 2020 г.

Результаты статистического анализа

На диаграмме (рис. 6) показано распределение количества объектов малой энергетики по типу оборудования.

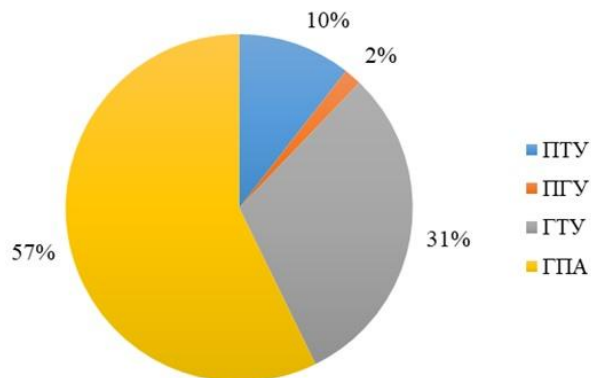


Рис. 6. Распределение количества объектов мини-ТЭЦ (ТЭС) по типу оборудования

Отсюда видно, что наиболее распространены станции на основе газопоршневых агрегатов (825 шт.), газотурбинных установок (448 шт.) и паротурбинных установок (154 шт.). Совсем небольшую долю имеют парогазовые станции (25 шт.). Общее количество объектов на основе тепловых двигателей единичной мощностью до 25 МВт составляет 1452 штуки.

Очевидно, что по общему количеству установок нельзя судить о вырабатываемой мощности (см. рис. 7). Так, несмотря на то, что газопоршневых агрегатов практически в два раза больше, чем газотурбинных, их общая вырабатываемая мощность в 1,36 раз меньше. Это связано с тем, что у ГПА единичная мощность агрегатов меньше, чем у ГТУ. Общая мощность станций с ГТУ равна 8143 МВт, с ГПА – 5987 МВт, с ПГУ - 2634 МВт, с ПТУ – 1185 МВт. В итоге, суммарная мощность, приходящаяся на малые объекты теплоэнергетической генерации, составляет около 18 ГВт.

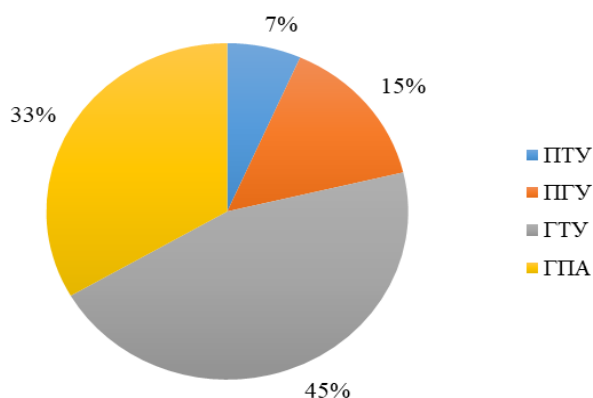


Рис. 7. Распределение установленных мощностей станций по типу оборудования

Рассмотрим динамику ввода в эксплуатацию станций с 1995 по 2020 год по типу оборудования (рис. 8). Анализ данных показывает, что с 2000 года начали активно внедрять газопоршневые установки. При этом ГПА и ГТУ конкурируют друг с другом. Пик по строительству станций на базе паротурбинных установок пришелся на период с 2001 по 2005 год, затем активность их строительства заметно снизилась. Мини-ТЭЦ на основе ПГУ стали эксплуатировать с 2004 года. Пик по общему количеству введенных энергоисточников пришелся на период с 2006 по 2010 год.

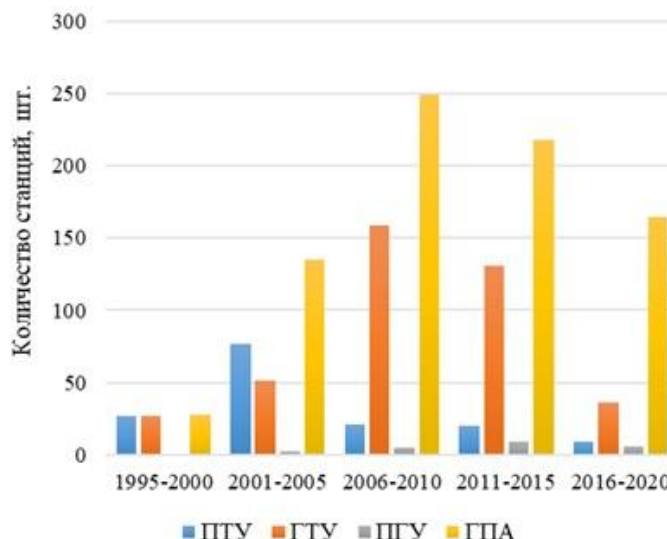


Рис. 8. Динамика ввода станций в эксплуатацию по годам

Диаграмма на рис. 9 подтверждает, что ГТУ успешно конкурируют с ГПА по общей мощности, вводимой по пятилеткам. ПТУ со временем вытесняются и составляют все меньшие значения, как по общей мощности, так и по их доле в общей мощности строящихся станций. Следует отметить, что ПГУ, несмотря на сложность схемы, и высокую стоимость, также заметны в общей картине малой энергетики.

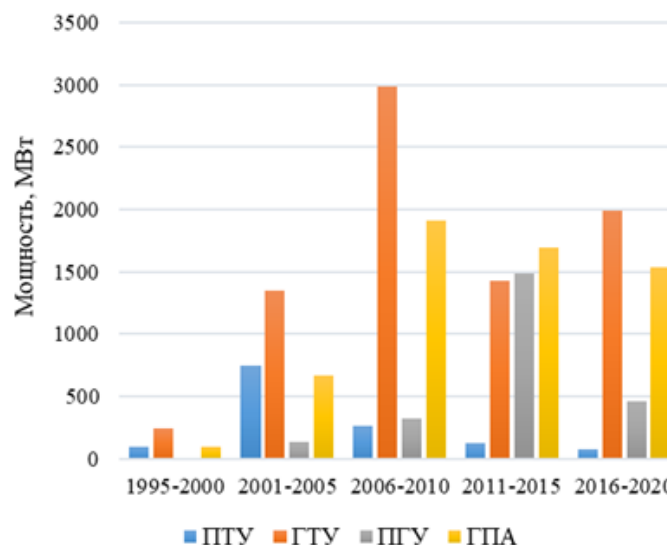


Рис. 9. Динамика ввода мощностей различных типов станций по годам

Из общей динамики ввода мощностей (рис. 10) видно, что их пик пришелся на 2006-2010 г. С 2010 года ввод мощностей и количества станций начал уменьшаться.

Снижение темпов роста малой энергетики можно объяснить несколькими причинами. Вероятно, главная причина в том, что в 2014 г. изменилась политическая ситуация в мире, снизились инвестиции в российскую экономику. Поввысились требования к степени локализации продукции, выпускаемой по лицензии, взят курс на замену зарубежного оборудования отечественным. В то же время в производстве ГТУ и ГПА в нашей стране пока имеются немалые проблемы.

Кроме того, в последние годы изменились ориентиры в развитии российской энергетики в Министерстве энергетики РФ. Ставка делается на развитие СЭС и ВЭС, а также на реализацию договоров по предоставлению мощности. Такие объекты являются фактически объектами планового хозяйства с источниками финансирования крупными компаниями такими, как Роснано, Турбоатом, Газпром, внешних инвесторов.

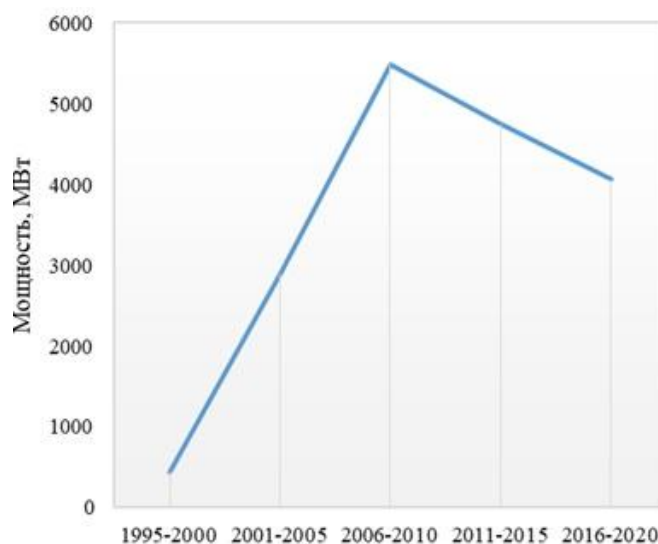


Рис. 10. Динамика ввода мощностей объектов малой энергетики по годам

Анализ распределения ввода количества станций по округам (рис. 11) показывает, что лидерами являются Уральский и Центральный округ.

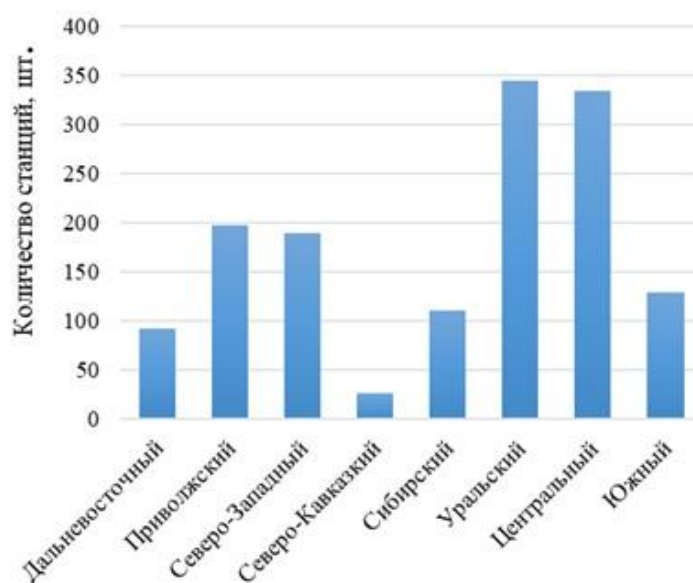


Рис. 11. Распределение мини-ТЭЦ (ТЭС) по федеральным округам

По отраслям очевиден приоритет в развитии малой энергетики в промышленности (перерабатывающей и машиностроительной) – 34,2%, а также в топливно-добывающем комплексе – 28% (см. рис. 12). Значительное количество станций введено в работу в электрогенерирующем секторе – 17,7% и в коммунальном хозяйстве – 17,5%.

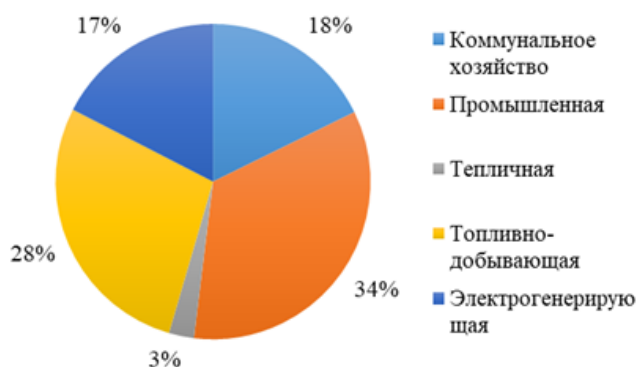


Рис. 12. Распределение мини-ТЭЦ (ТЭС) по отраслям

Заключение

Выполненная работа позволяет дать оценку достижений и состояния в области малой тепловой энергетики, которая развивалась стихийно в соответствии с текущими потребностями различных отраслей экономики в условиях конкуренции с большой энергетикой. Количество объектов около 1500 и общая мощность 18 ГВт или 11% от общей мощности всех тепловых станций дают ясное представление о заметной роли малой энергетики в нашей стране на текущий момент. Достоинством настоящей работы является тот факт, что количественные показатели получены на основе Перечня, включающего станции с конкретными адресами и характеристиками. Открытый доступ к Перечню позволяет выполнить проверки любых показателей, приведенных в статье, а также получить новые абсолютные и относительные показатели.

Литература

1. Щеглов А.Г. Стратегия развития тепловых электростанций на территории России. М.: ОАО Издательство: Стройиздат, 2007. 216 с.
2. Филиппов С.П. Малая энергетика в России // Теплоэнергетика. 2009. № 8. С. 38-44.
3. Маляренко В. А., Шубенко А.Л., Сенецкий А.В., Темнохунд И.А. Тенденции модернизации объектов малой энергетики на базе когенерации // Ползуновский вестник. 2013. № 4-3. С. 131-137.
4. Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., Табакаев Р.Б. Малая распределенная энергетика России: совместная выработка тепло- и электроэнергии // Вестник науки Сибири. 2013. № 4 (10). С. 13-18.
5. Филиппов С.П., Дильман М. Перспективы использования когенерационных установок при реконструкции котельных // Промышленная энергетика. 2014. № 4. С. 7-11.
6. Некрасов А.С., Синяк Ю.В., Воронина С.А. Перспективы развития теплоснабжения России // Энергия: экономика, техника, экология. 2014. № 2. С. 2-11.
7. Новоселова О.А. Распределенная энергетика в России: тенденции и перспективы. // Региональная энергетика и энергосбережение. 2018. №5. С. 12-14.
8. Бухгольц Б. М., Стычински З.А. Smart Grids – основы и технологии энергосистем будущего. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 461 с.
9. Маркова В.М., Чурашев В.Н. Децентрализация энергетики: интеграция и инновации // ЭКО. 2020. №4. С. 8-27.
10. Петрущенко В.А. Коршакова И.А. Перечень мини-ТЭЦ и ВИЭ на май 2020. Файл в Excel [Электронный ресурс] Доступно по: // <https://www.twirpx.org/file/3156717/> Ссылка активна на: 2 октября 2020.
11. Петрущенко В. А., Коршакова И. А. Перечень мини-ТЭЦ (ТЭС) на май 2020. Файл в Word [Электронный ресурс] Доступно по: // <https://www.twirpx.org/file/3158322/> Ссылка активна на: 2 октября 2020.
12. Агентство «Бизнес Интернэшнл» (АБИ). [Электронный ресурс] Доступно по: // <http://businessinter.ru/> Ссылка активна на: 7 сентября 2020.

13. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., и др. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М.: Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 2018. 87 с.
14. Маркова В.М., Чурашев В.Н. Возможности повышения эффективности и оптимизации структуры энергетики: роли «большой» и «малой» генерации // Мир экономики и управления. 2017. Т. 17. № 3. С. 62-84.
15. Петрущенко В.А. Обсуждение целесообразности использования термина «мини-ТЭЦ» // Новости теплоснабжения. 2004. №7. С. 29-30.
16. Батенин В.М., Бушуев В.В., Воропай Н.И. (под редакцией авторов). «Инновационная электроэнергетика – 21» М.: ИЦ «Энергия», 2017. 584 с.
17. Петрущенко В.А., Васькин В.В. Тепловые схемы мини-ТЭЦ на базе противодавленческих паровых турбин, применяемые в рабочих проектах // Новости теплоснабжения. 2004. №8. С. 22-26.
18. Петрущенко В.А., Васькин В.В. Сравнительные характеристики тепловых схем мини-ТЭЦ на базе противодавленческих паровых турбин // Новости теплоснабжения. 2005. №2. С. 32-37.
19. Васькин В.В., Петрущенко В.А. Регулирование режимов работы мини-ТЭЦ с противодавленческими турбинами при работе на отопительную нагрузку // Новости теплоснабжения. 2005. №4. С. 20-26.
20. Петрущенко В.А., Васькин В.В. К определению технико-экономических показателей мини-ТЭЦ // Новости теплоснабжения. 2004. №6. С. 25-28.

Авторы публикации

Петрущенко Валерий Александрович – канд. техн. наук, доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики (ВШ АиТЭ) Института энергетики (ИЭ) Санкт-Петербургского политехнического университет Петра Великого (СПбПУ).

Коршакова Ирена Александровна – бакалавр, студентка 5-го курса высшей школы атомной и тепловой энергетики (ВШ АиТЭ) Института энергетики (ИЭ) Санкт-Петербургского политехнического университет Петра Великого (СПбПУ).

References

1. Shcheglov AG. Strategiya razvitiya teplovykh elektrostantsii na territorii Rossii. M.: OAO Izdatel'stvo: Stroiizdat. 2007. 216 P.
2. Filippov SP. Malaya energetika v Rossii. *Teploenergetika*. 2009;8:38-44.
3. Malyarenko VA, Shubenko AL, Senetskii AV, et al. Tendentsii modernizatsii ob'ektov maloi energetiki na baze kogeneratsii. *Polzunovskii vestnik*. 2013;4-3:131-137.
4. Kazakov AV, Zavorin AS, Novosel'tsev PYu, et al. Malaya raspredelennaya energetika Rossii: sovmestnaya vyrabotka teplo- i elektroenergii. *Vestnik nauki Sibiri*. 2013;4(10):13-18.
5. Filippov SP, Dil'man M. Perspektivy ispol'zovaniya kogeneratsionnykh ustanovok pri rekonstruktsii kotel'nykh. *Promyshlennaya energetika*. 2014;4:7-11.
6. Nekrasov AS, Sinyak YuV, Voronina SA. Perspektivy razvitiya teplosnabzheniya Rossii // *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2014;2:2-11.
7. Novoselova OA. Raspredelennaya energetika v Rossii: tendentsii i perspektivy. *Regional'naya energetika i energosberezhenie*. 2018;5:12-14.
8. Bukhgo'l'ts BM, Stychinski ZA. *Smart Grids – osnovy i tekhnologii energosistem budushchego*. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2017. 461 P.
9. Markova VM, Churashev VN. *Detsentralizatsiya energetiki: integratsiya i innovatsii*. EKO. 2020;4:8-27.
10. Petrushchenkov VA, Korshakova IA. *Perechen' mini-TETs i VIE na mai 2020*. [Elektronnyi resurs] Available at: // <https://www.twirpx.org/file/3156717/> Accessed to: October 2, 2020.
11. Petrushchenkov VA, Korshakova IA. *Perechen' mini-TETs (TES) na mai 2020*. [Elektronnyi resurs] Available at: // <https://www.twirpx.org/file/3158322/> Accessed to: October 2, 2020.
12. *Agentstvo Biznes Interneshnl (ABI)*. [Elektronnyi resurs] Available at: // <http://businessinter.ru/> September, 2020.
13. Khokhlov A, Mel'nikov Yu, Veselov F, et al. *Raspredelennaya energetika v Rossii: potentsial razvitiya*. M.: Energeticheskii tsentr Moskovskoi shkoly upravleniya «Skolkovo», 2018. 87 p.

14. Markova VM, Churashev VN. Vozmozhnosti povysheniya effektivnosti i optimizatsii struktury energetiki: roli «bol'shoi» i «maloi» generatsii. *Mir ekonomiki i upravleniya*. 2017;17(3):62-84.
15. Petrushchenkov VA. Obsuzhdenie tselesoobraznosti ispol'zovaniya termina mini-TETs. *Novosti teplosnabzheniya*. 2004;7:29-30.
16. Batenin V.M, Bushueva VV, Voropay NI. Innovatsionnaya elektroenergetika. M.: ITS «Energiya». 2017. 584 p.
17. Petrushchenkov VA, Vas'kin VV. Teplovye skhemy mini-TETs na baze protivodavlencheskikh parovykh turbin, primenyaemye v rabochikh proektakh. *Novosti teplosnabzheniya*. 2004;8:22-26.
18. Petrushchenkov VA, Vas'kin VV. Sravnitel'nye kharakteristiki teplovykh skhem mini-TETs na baze protivodavlencheskikh parovykh turbin. *Novosti teplosnabzheniya*. 2005;2:32-37.
19. Vas'kin VV, Petrushchenkov VA. Regulirovanie rezhimov raboty mini-TETs s protivodavlencheskimi turbinami pri rabote na otopitel'nyu nagruzku. *Novosti teplosnabzheniya*. 2005;4:20-26.
20. Petrushchenkov VA, Vas'kin VV. K opredeleniyu tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei mini-TETs. *Novosti teplosnabzheniya*. 2004;6:25-28.

Authors of the publication

Valery A. Petrushchenkov – Sankt-Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

Irena A. Korshakova – Sankt-Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию

26 октября 2020г.



ВЫБОР СТРУКТУРЫ ТЕПЛОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ГОРОДАХ РФ ПРИ АКТУАЛИЗАЦИИ СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Е.А. Кикоть¹, Ф.Н. Газизов²

¹ООО «Невская Энергетика», г. Санкт-Петербург, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
eak@nevaenergy.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Провести анализ материалов схем теплоснабжения крупных городов России, рассмотреть влияние «котельнизации» городов при планировании развития и модернизации источников теплоснабжения. Разработать методику выбора структуры тепловой генерации городов, отличающуюся применением дополнительного критерия энергоэффективности и системой учитываемых ограничений по энергетическим балансам региона. Показать ослабление внимания к общей энергетической эффективности совокупностей источников тепловой генерации, выявить дополнительный резерв повышения энергетической эффективности теплоснабжения городов. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи, с применением метода сравнительного анализа рассматривались схемы теплоснабжения крупных городов Российской Федерации за последние 7-10 лет. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, создана методическая база, направленная на повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения города. Предложен критерий, учитывающий различную эффективность источников и структурные эффекты, реализуемые при выборе состава работающих тепловых источников для перспективного развития городской застройки. Приведены основные положения, используемые соотношения, особенности разработанной методики. Сделан вывод о целесообразности и эффективности данных предложений при использовании данной методики. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная методика выбора структуры тепловой генерации апробирована при анализе схем крупных городов РФ. Эффективность на примере районов г. Нижний Новгород составила от 16,5 млн. до 180,0 млн. рублей в год.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, критерии, методика, структурный эффект, тепловой баланс, баланс электрической мощности, условия сопоставимости.

Для цитирования: Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 71-82. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82.

SELECTION OF THE STRUCTURE OF THERMAL GENERATION IN CITIES OF THE RUSSIAN FEDERATION WHEN ACTUALIZING THE HEAT SUPPLY SCHEMES

EA. Kikot¹, FN. Gazizov²

¹LLC "NevskayaEnergetica", S-Petersburg, Russia

²Kazan state power engineering university, Kazan, Russia
eak@nevaenergy.ru

Abstract: THE PURPOSE. To analyze the materials of heat supply schemes for large cities of Russia, to consider the impact of an increase in the number of boiler houses in cities when planning the development and modernization of heat supply sources. To develop a

methodology for choosing the structure of thermal generation in cities, which is distinguished by the use of an additional criterion for energy efficiency and a system of taken into account restrictions on the energy balances of the region. The weakening of attention to the overall energy efficiency of the aggregates of heat generation sources is shown, an additional reserve for increasing the energy efficiency of heat supply of cities is identified. **METHODS.** When solving this problem, methods of comparative analysis of the heat supply schemes of large cities of the Russian Federation over the past 7-10 years is used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, created a methodological base aimed at increasing the energy efficiency of heat supply systems in the city. A criterion is proposed that takes into account the different efficiency of sources and structural effects that are realized when choosing the composition of working heat sources for the prospective of urban development. The basic provisions, the relations used, the features of the developed methodology are given. A conclusion is drawn on the appropriateness and effectiveness of these proposals when testing this method. **CONCLUSION.** The developed method for choosing the structure of thermal generation was tested in the analysis of schemes of large cities of the Russian Federation. Efficiency on the example of the districts of Nizhny Novgorod ranged from 16.5 million to 180.0 million rubles per year.

Keywords: energy efficiency, criteria, methodology, structural effect, heat balance, balance of electric power, comparability.

For citation: Kikot EA, Gazizov FN. Selection of the structure of thermal generation in cities of the Russian Federation when actualizing the heat supply schemes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):71-82. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82.

Введение

За последние четверть века отрасль теплоснабжения в России претерпела значительные изменения. В настоящее время имеются прогрессивные технические решения, позволяющие совершенствовать систему теплоснабжения, однако в то же время, в условиях рыночной экономики, механизмы регулирования сферы теплоснабжения изменились, что, к сожалению, не всегда приводит к положительным результатам.

Основными системными проблемами отрасли теплоснабжения являются:

- снижение объемов отпуска тепловой энергии с теплоэлектростанций (ТЭЦ);
- снижение надежности источников тепловой энергии;
- снижение надежности тепловых сетей;
- высокая задолженность за потребленные топливно-энергетические ресурсы в сфере теплоснабжения.

С целью решения накопившихся проблем в сфере теплоснабжения в 2010 г. был принят Федеральный закон «О теплоснабжении» и ряд подзаконных актов к нему, включая нормативно-правовую базу по разработке схем теплоснабжения, которые разрабатывались в Советском Союзе, начиная с послевоенного периода и были нацелены на выбор оптимального варианта организации теплоснабжения потребителей в эпоху плановой экономики и динамичного развития в первую очередь промышленности.

Таким образом, в стране из более чем 20 тысяч муниципальных образований почти в 12 тысяч из них необходимо разрабатывать и актуализировать схемы теплоснабжения в соответствии с современными требованиями НПА.

На сегодня муниципальные образования разработали схемы теплоснабжения своих территорий, качество которых очень разное.

Решения по развитию систем теплоснабжения городов на базе выбора типа источника организации теплоснабжения достаточно разные и их выбор обусловлен разными обстоятельствами: соответствие решениям, изложенным в Генеральном плане развития территории, региональной Схеме и программе развития электроэнергетики, решения инвестиционных программ теплоснабжающих организаций, пожелания администраций городов по строительству того или иного источника и др.

При этом отсутствует методический подход и инструментарий для оперативной комплексной укрупненной оценки выбора оптимального варианта организации теплоснабжения на расчетный период действия схемы теплоснабжения, который поможет в работе федеральных и региональных органов власти, ответственных за мониторинг и утверждение схем теплоснабжения городских округов и поселений.

Цель настоящей статьи: подготовить научно-обоснованные предложения по совершенствованию методологии разработки схем теплоснабжения поселений, городских округов.

При рассмотрении вопросов повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения городов, были проанализированы материалы информационно-аналитических докладов, международных технико-экономических журналов, содержащие анализ деятельности систем теплоэнергетики и теплоснабжения Российской Федерации в последние годы, на основе статистической информации, сведений, полученных из информационных систем отраслевых министерств и ведомств и других официальных источников (Эффективность использования топлива в городах РФ (по материалам схем теплоснабжения) Кикоть Е.А. 2018. С.107-114; Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2015-2016 годы. М., Минэнерго РФ, 2018).

Анализом проблем энергетической эффективности систем теплоснабжения городов занимались отечественные ученые: Л.А. Мелентьев (1932-1998 гг.), Е.Э. Шубин (1964-1976 гг.), Е.Я. Соколов (1947-1998 гг.), В.Н. Папушкин (2006 г. по настоящее время), Е.Г. Гашо (1988г. по настоящее время) и др. Теория анализа развития больших систем энергетики в основном складывалась на опыте анализа систем электроэнергетики в 60-е годы прошлого столетия. Системы теплоснабжения городов стали объектом исследования ряда отраслевых институтов (ВТИ, ВНИИЭ, ВНИПИЭнергопром, ИСЭ, ЭНИН, ВНИИКТЭП, МЭИ, Теплоэлектропроект, позднее ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ее филиалы в Сибири и на Урале). Исследования и разработки этих институтов сформировали научную методологию разработки перспективных схем теплоснабжения городов в рамках плановой экономики.

Материалы и методы

Условия работы теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) при становлении розничных рынков электрической и тепловой энергии существенно отличается от тех условий, для которых они проектировались. Специалисты обращают внимание на потери значительных долей рынков как тепловой, так и электрической энергии многими ТЭЦ в России за последние 28 лет. Коэффициент использования топлива на ТЭЦ снижался до 52,1% (2008 г.) и до сих пор не достиг уровня 1992 года (56,1 %) и в 2016 г. составлял 54,9 %. Суммарная установленная мощность ТЭЦ в 2016 г. даже по сравнению с 2012 г. снизилась на 18,2 % [1].

При этом общая энергетическая эффективность систем теплоснабжения проявляет тенденцию к многолетней «стабилизации» на достигнутом уровне, а в некоторых городах – к регрессу, связанному с тем, что часть потребителей переходит на свои собственные источники – котельные, которые по энергетической эффективности уступают ТЭЦ.

Решению задачи повышения энергетической эффективности теплоснабжения городов сопутствует учет как технических, так и экономических факторов. К ним относятся: особенности исторически сложившейся структуры городов и уже построенных объектов энергетической инфраструктуры, состояние систем теплоснабжения (оборудования источников теплоснабжения и тепловых сетей), режимы работы ТЭЦ, климатологические характеристики региона и особенности складывающихся рыночных условий. На данном этапе представляется важным анализировать проведенные в последние годы разработки перспективных схем теплоснабжения городов и предложить направление их совершенствования.

Полезно вспомнить, что в плановой экономике схемы теплоснабжения являлись той основой, на которой проектировались источники централизованного теплоснабжения городов (включая трубопроводные сети транспорта тепловой энергии): ТЭЦ и котельные. За полвека формирования этих систем научными организациями и проектными институтами был накоплен значительный опыт выбора оптимальных путей развития теплофикации. Однако в условиях рыночных (хотя и в значительной степени - регулируемых) отношений в сфере энергетики задачи оценки и выбора путей развития систем теплоснабжения существенно усложнились [2], что требует нового осмысления,

разработки методов и критериев с целью совершенствования этих систем и повышения их энергетической эффективности.

Как было сказано ранее, проблемой анализа и оценки общей энергетической эффективности систем теплоснабжения городов занимались отечественные ученые. Системы теплоснабжения городов, как важнейшая часть систем жизнеобеспечения, достигли максимальной централизации в 70-е годы.

Определенным стимулом для возобновления работ по схемам теплоснабжения городских поселений послужил Федеральный Закон от 2010 г. №190 «О теплоснабжении», а после выхода постановления Правительства РФ от № 154 в 2014 г. разработка схем теплоснабжения приобрела систематический характер. Методология разработки схем теплоснабжения должна была соответствовать рыночным условиям, и в то же время реализовать научные подходы к анализу и прогнозированию новых условий существования сложных систем теплоснабжения. Однако формирование механизмов рыночного управления развитием этих систем не завершено и продолжается в настоящее время.

Предложение реформирования сферы теплоснабжения обсуждается профессиональным сообществом и пока регионами воспринимается настороженно. По мнению авторитетных экспертов [3,4] «является важным (при разработке схем теплоснабжения городов – прим.авт.) обеспечить творческий сплав отработанных балансовых методов и современных подходов на основе применения моделирующих комплексов...».

Методы анализа энергетической эффективности схем теплоснабжения должны адекватно отражать как сложившиеся условия их существования, так и параметры их будущего развития, а также находить пути улучшения общей энергетической эффективности теплоснабжающих комплексов.

При решении перечисленных выше задач возникает новый аспект научных исследований в направлении создания методической базы, позволяющей получать решения, обеспечивающие наилучшую совместную работу тепловых источников и повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения города в целом.

Для совершенствования методики выбора структуры тепловой генерации городов был проведен анализ материалов схем теплоснабжения городов, при котором выявлено следующее:

- при исполнении существующего регламента энергоэффективность принятого варианта отражается в схемах в виде целевого показателя, однако варианты мастер-плана по этому показателю не сравниваются, а лишь фиксируется значение для выбранного по другим критериям варианта,
- процесс «котельнизации» городов, развернутый в 90-х годах прошлого столетия, не нашел серьезных ограничений в рамках рассмотрения и утверждения новых схем теплоснабжения, а определялся лишь интересами «девелоперов» новой застройки, и тем самым – сохранил консервативную тенденцию снижения энергоэффективности теплоснабжения по городу в целом,
- назрела насущная необходимость разработать методику выбора структуры тепловой генерации, которая бы учитывала энергетическую эффективность совокупности источников в целом по городу, и позволяла бы на этапе разработки и актуализации схем создавать условия для улучшения показателей теплоснабжения.

Результаты и обсуждение

Развитие научной методологии оценки энергетических структур при различных этапах становления и развития теплофикации в нашей стране отражает Таблица 1. Традиционно реализовывалось разделение труда в сфере исследований и проектирования систем: сложные вопросы моделирования энергетических систем проводилось силами специализированных научных организаций (институтов АН СССР, прикладных НИИ), а принятие решений по конкретным объектам – в рамках инженерных изысканий проектными организациями. Выходом чисто научных подходов являлись некие рекомендации, которые реализовывались при исполнении конкретных проектов.

Чтобы оценить отличия предлагаемой методики, следует учитывать исторически сложившееся разделение академических научных исследований систем и технологий, и инженерную практику использования результатов таких исследований. Как правило,

комплексное математическое моделирование, многовариантный анализ и оптимизация осуществлялась в академической среде (особенности этих подходов – в средней колонке табл. 1). Инженерная практика (правая колонка табл. 1) базировалась на этих результатах, используя РЕКОМЕНДАЦИИ. И в данном случае – для разработки методики важно было обосновать:

- Определяющий критерий;
- Совокупность обязательных к учету ограничений.

С одной стороны, в плановой экономике исследования «больших» систем энергетики представляло особую сложность, так как по необходимости охватывало практически весь комплекс ТЭК страны. Для этого нужны были беспрецедентно сложные и масштабные модели. И это составляло главную проблему и трудность: охватить весь комплекс. С другой стороны, когда на основе этого были определены «оптимальные» пути формирования и развития систем, то ключевые параметры этих систем предлагались институтам, занятым конкретными проектами (источников теплоснабжения, электроснабжения, электрических и тепловых сетей) в виде «методических указаний». Такими параметрами, например, были: оптимальные удельные капиталовложения в ТЭС, АЭС, ТЭЦ, тепловые и электрические сети, «оптимальный» (для данной отрасли) коэффициент окупаемости этих вложений, затраты на «замещающую мощность» (последние – определились по отраслям и временным периодам специализированными научными институтами в рамках расчетов «межотраслевых балансов», на основе «больших моделей»).

Таблица 1

Связь научной методологии анализа сложных систем теплоснабжения и методик, используемых при проектировании источников и сетей теплоснабжения городов

Характерные особенности	Научная методология (исследования «больших» систем энергетики)	Инженерная практика (разработка схем теплоснабжения городов)
Акценты в анализе	Наиболее существенные связи, общие закономерности и соотношения параметров источников, сетей и потребителей	Учет конкретных условий в данном регионе, оценка перспективы нагрузок, обоснование развития источников, либо сооружение новых
Инструментарий анализа	Иерархия моделей «больших» систем энергетики (в т.ч. – электроэнергетических)	Пакеты прикладных программ («Сириус» - Карагандинский политехнич.ин-т, «ZULU», Теплограф и др.
Формализация задачи (авторы, институты)	ИСЭМ: Мелентьев Л.А., Сидлер В.Г., Сеннова Е.В., Стенников В.А.	ВТИ: Папушкин В.Н., Григорьев А.Г., МЭИ: Гашо Е.Г., Пузаков В.С., СПбГУПТД: Плехута А.Д.
Особенности методик, степень универсальности результатов	Стремление к полной математической формализации на основе многофакторного анализа, аппроксимации зависимостей и отражения реальных условий путем задания ограничений	Использование «обобщенных зависимостей» и «Критериев выбора вариантов»
Способы поиска решений, их аргументации и выбора	Методы нелинейного программирования, а – в ряде подзадач целевого/«полного» перебора вариантов	Использование «целевых» показателей, учет ограничений в форме допустимых областей для параметров, либо – задание вариантов развития

Исходя из изложенных выше ключевых моментов, сделан вывод, что регламент оценки систем, осуществляемый на практике, слишком упрощен в оценке общей энергетической эффективности совокупности тепловых источников города. Он не учитывает ряд ключевых моментов, и, в частности, не предполагает обязательной оценки варианта с максимальным увеличением отпуска тепловой энергии от ТЭЦ. Известны исследования (например [5]), в которых показана недостаточность использования концепции радиуса эффективного теплоснабжения для однозначного отнесения

потребителей к той или иной зоне теплоснабжения. Методика обоснования тепловой генерации должна основываться на использовании критерия общей энергетической эффективности всей совокупности источников на перспективу.

Приняв за основу известное определение удельного расхода условного топлива - как основного показателя энергетической эффективности любой энергетической установки и системы, распространим его применение на совокупность таких систем, обеспечивающих тепловой энергией городское поселение. Тогда общий расход топлива всеми системами поселения выразится так:

$$B_c = b_1 \cdot Q_1 + b_2 \cdot Q_2 + b_3 \cdot Q_3 + \dots b_n \cdot Q_n \quad (1)$$

где $b_1 \dots b_n$ – удельные расходы топлива на отпущенную тепловую энергию, соответственно, от каждого из источников совокупности, тут/Гкал,

$Q_1 \dots Q_n$ – отпуск тепловой энергии, соответственно, от каждой из систем, составляющих совокупность.

В самом общем случае изменение энергоэффективности совокупности выражается следующим уравнением:

$$\Delta B_c = B'_c - B_c = (B'_1 + B'_2 + \dots B'_n) \quad (2)$$

Перейдем к обозначениям «изменений»: $\Delta Q_i = Q'_i - Q_i$ – изменения отпуска тепловой энергии i -той системой (источником), $\Delta b_i = b'_i - b_i$ – изменения удельного расхода условного топлива, соответственно i -той системой (источником); здесь «штрих» означает «после изменения», буквенные обозначения «без штриха» – «до изменения», или значение «базисного» периода с которым проводят сравнение. Введем «относительные отпуска» q_i , для вычисления которых поделим абсолютный отпуск тепловой энергии i -того источника на суммарный отпуск для всей совокупности $q_i = \frac{Q_i}{Q_c}$, и получим общее выражение для изменения энергоэффективности для совокупности систем (источников тепловой энергии):

$$\Delta bc = (\Delta b_1 \cdot q'_1 + b_1 \cdot \Delta q_1) + (\Delta b_2 \cdot q'_2 + b_2 \cdot \Delta q_2) + (\Delta b_n \cdot q'_n + b_n \cdot \Delta q_n) \quad (3)$$

При разработке планов развития городов и схем их теплоснабжения обязательной является оценка энергетической эффективности, и для этого должен использоваться показатель, показывающий соотношение выработки электроэнергии на тепловом потреблении и суммарной подключенной тепловой нагрузки городов.

С учетом логики обоснования выражений (1)-(3) в качестве инструмента такой оценки при выборе структуры тепловой генерации в схеме теплоснабжения города предлагается использовать соотношение:

$$q_{\text{тф}}^{\text{S}} = \frac{\sum \alpha Q_{\text{НАГР}}^{\text{ТЭЦ}}}{\sum [\alpha Q_{\text{НАГР}}^{\text{ТЭЦ}} + (1 - \alpha) Q_{\text{НАГР}}^{\text{ТЭЦ}}] + \sum Q_K} \quad (4)$$

α – коэффициент теплофикации, отражает влияние на энергоэффективность теплофикационной нагрузки, покрываемой из отборов турбин,

$Q_{\text{НАГР}}^{\text{ТЭЦ}}$ – отпуск тепловой энергии от i -той ТЭЦ города (поселения), Гкал/год;

Q^K – отпуск тепловой энергии от j -той котельной города (поселения), Гкал/год.

Это отношение фактически эквивалентно сумме всех структурных эффектов (вторые части двучленов выражения для ТЭЦ города: чем больше это значение – тем большая доля тепловой энергии в городе вырабатывается в комбинированном цикле. Тем самым создается главная предпосылка для увеличения объема выработки тепловой и электрической энергии в комбинированном (теплофикационном) цикле. Критерий (4) – безразмерная величина; для систем, в которых нет ТЭЦ, его значение равно нулю. При появлении теплофикационных агрегатов на котельных (например, ГПУ для обеспечения локальных нужд теплофикации) значение этого показателя отлично от нуля, и также характеризует «уровень теплофикации» по совокупности тепловых источников города.

Каждый член в сумме числителя этого выражения (для каждого отдельного источника) может быть умножен на W – удельную выработку электрической энергии на

базе отпуска данного тепла из отборов турбин (МВт-ч/Гкал). Эта величина – различна для каждого типа источника тепло- электрогенерации, и является важнейшей характеристикой уровня его энергетической эффективности. Таким путем осуществляется переход от анализа структуры выработки и отпуска тепловой энергии к совместному анализу тепловых и электрических балансов поселения на перспективу по параметру «энергоэффективности»:

$$\Theta_c = \frac{\sum w \alpha Q_{\text{НАГР}}^{\text{ТЭЦ}}}{\sum [\alpha Q_{\text{НАГР}}^{\text{ТЭЦ}} + (1-\alpha) Q_{\text{НАГР}}^{\text{ТЭЦ}}] + \sum Q_K} \quad (5)$$

где: w – удельная выработка электрической мощности на тепловом потреблении, прочие обозначения соответствуют (4);

Θ_c – отношение годовой выработки электроэнергии в теплофикационном цикле ТЭЦ к суммарному годовому отпуску тепловой энергии от всех тепловых источников города. В физическом понимании это значение показывает «удельную» выработку электроэнергии, полученной комбинированным способом на всех ТЭЦ рассматриваемой территории, приходящуюся на единицу суммарного тепла, выработанного ТЭЦ и котельными поселения.

Итоговым критерием оценки варианта по структуре тепловой генерации является минимум целевой функции, представляющей собой сумму приведенных (дисконтированных) по времени ($t = 1, T$) затрат во вновь монтируемые потребительские установки, в существующие источники тепла, затраты в сети энергоснабжения (в необходимых для теплоснабжения объемах), а также затраты на дополнительную электроэнергию (для приведения вариантов к сопоставимому виду по энергетическим эффектам):

$$Z_{\text{ИТ}} + Z_{\text{ТС}} + Z_{\text{Э}} \rightarrow \min \quad (6)$$

где $Z_{\text{ИТ}}$ – затраты в источники тепла, $Z_{\text{ТС}}$ – затраты в тепловые сети, $Z_{\text{Э}}$ – затраты на электроэнергию, затрачиваемую на перекачку теплоносителя по системе в каждый период по каждому из рассматриваемых вариантов развития системы.

Затраты на дополнительную электроэнергию ($Z_{\text{ДЭ}}$) – представляют собой стоимость электроэнергии, обеспечивающей приведение вариантов к равному энергетическому эффекту. Они равны произведению предельного уровня тарифа на электроэнергию ($Z_{\text{ДЭ}}$, руб./МВт) на ее дополняющий объем ($\Delta \mathcal{E}$, МВт):

$$Z_{\text{ДЭ}} = \sum_{t=1}^T Z_{\text{ДЭ}t} \sum_{j_2} W_{jt} h_t \quad (7)$$

Система условий и ограничений включает: уравнения материального (в узлах) и энергетического (в независимых контурах) баланса, а также замыкающие соотношения, которые описывают сетевую часть теплоснабжающих систем; технические условия и ограничения: на давления теплоносителя в узлах, на скорости течения теплоносителя по ветвям; на располагаемые перепады давления теплоносителя на вводах потребителей; на производительности (мощности) источников тепловой энергии (и др).

Для отражения сформулированных выше требований (по учету как тепловых, так и электрических балансов) в формализованной постановке задачи система условий и ограничений дополнена учетом балансов как тепловой, так и электрической мощности совокупности источников:

$$\sum_{j \in J_2} Q_j = Q \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J_2} P_j = P \quad (9)$$

$$\varphi \leq Q_j \leq \overline{Q_j}, \quad j \in J_2 \quad (10)$$

$$\varphi \leq P_j \leq \overline{P_j}, \quad j \in J_2 \quad (11)$$

Введение критерия (5) и учет дополнительных ограничений (8)-(11) изменяет процедуру выбора наилучшей структуры тепловой генерации в городе (для сложившихся условий и на перспективу), и является основанием для построения методики, которая

реализуется в комплексе алгоритмов и программ, общая структура которого приведена на рис. 1.

Интегральные показатели, приводимые в сводных таблицах схем теплоснабжения городов, отражают существующее положение в сфере теплоснабжения. Из этих данных можно построить оценки (табл. 2) того, насколько эффективно используются источники комбинированной выработки тепловой и электрической энергии (ТЭЦ) в городах России в сложившихся условиях и на перспективу.

Такое детальное рассмотрение общих показателей теплоснабжения крупных городов можно рассматривать, как реализацию основных методологических соображений, изложенных в свое время учеными НИУ «МЭИ», которые в заключение статьи указали, что «Работу [6] можно использовать как методологию определения ключевых характеристик пространственного распределения спроса на тепло в разных городах сопоставимого размера, находящихся в различных природно-климатических условиях». В данном случае это позволило выявить следующее: относительно высокий уровень затрат топлива на удовлетворение нужд теплоснабжения выявляется как в городах с относительно теплым климатом, так и расположенных в Сибири и Северных регионах России.

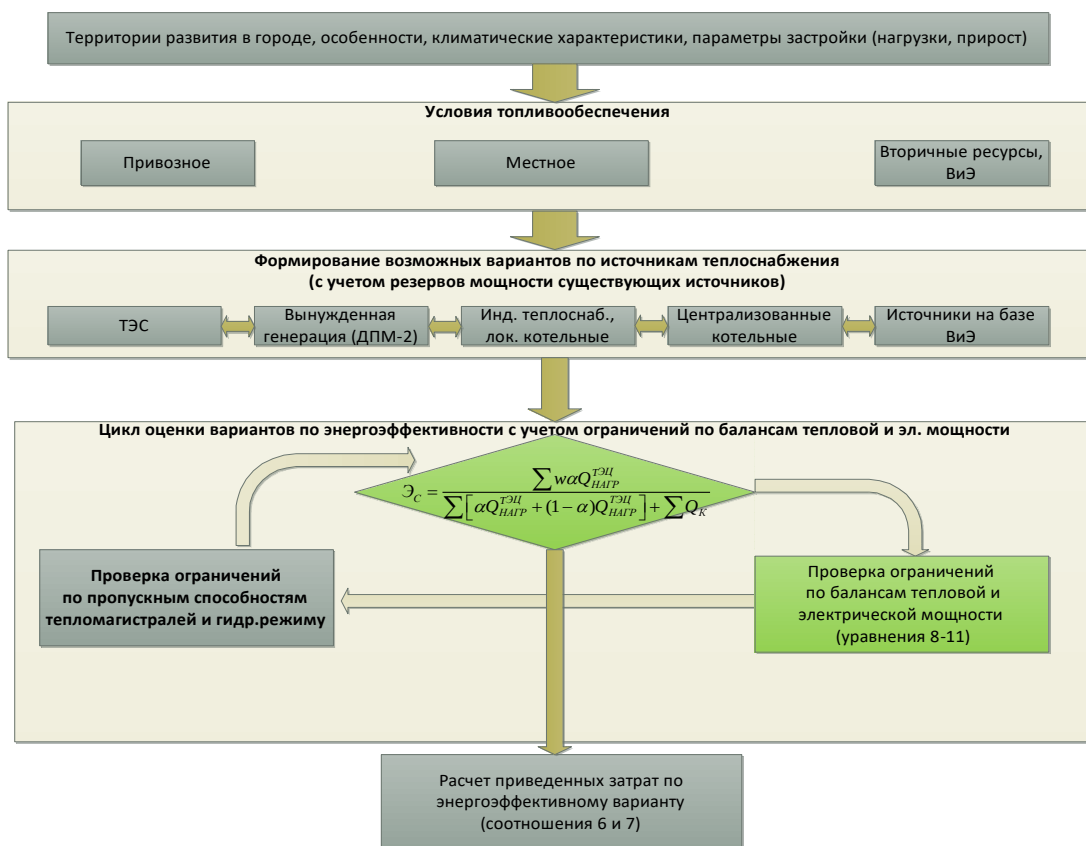


Рис.1. Общая структура. Взаимосвязь программных блоков, реализующих алгоритм выбора структуры тепловой генерации при актуализации схем теплоснабжения города (для сложившихся условий и на перспективу), и является основанием для построения методики, которая реализуется в комплексе алгоритмов и программ.

Таблица 2

Энергетическая эффективность выработки энергии (МВт*ч/Гкал) в крупных городах России

№ п/п	Город	Числен- ность населения, чел.	ГСОП, °С*сут./ год	Годовая выработка эл.энергии на ТЭЦ, тыс.кВт*ч		Годовой отпуск тепловой энергии от ТЭЦ, Гкал	Год.отпуск тепловой энергии от котельных , Гкал	Эффектив- ность выработки энергии, МВт*ч/Гкал
				теплофика- ционная	конденса- ционная			
1	Астрахань	532504	3 411,2	840 726	882 660	1 891 701	694 174	0,325
2	Владивосток	606589	4 811,4	1 090 780	855 220	3 225 290	1 717 025	0,221
3	Волгоград	1015586	3 924,8	1 546 516	623 867	2 723 600	5 091 600	0,198
4	Ижевск	646277	5 606,4	1 870 370	н/д	4 418 769	2 374 754	0,275
5	Кемерово	553076	6 356,0	1 923 677	1 435 334	5 950 700	6 717 600	0,152
6	Краснодар	881476	2 682,0	582 544	6 265 807	1 319 000	1 982 900	0,176
7	Красноярск	1035500	6 221,0	2 641 109	2 291 282	8 048 900	2 636 000	0,247
8	Махачкала	592976	2 491,2	58 900	0	277 809	954 101	0,048
9	Нижний Новгород	1264075	5 181,5	2 187 914	1 181 922	4 259 000	5 012 840	0,236
10	Новокузнецк	552445	6 197,1	1 882 699	1 798 979	6 099 408	76 707	0,305
11	Новосибирск	1602915	6 210,1	6 289 000	5 508 000	11 191 400	5 228 700	0,383
12	Омск	1178391	6 069,6	3 702 037	2 956 119	8 996 100	8 865	0,411
13	Оренбург	564443	5 312,6	1 263 227	1 161 934	3 007 446	1 382 683	0,288
14	Пенза	523726	3 903,9	902 038	434 525	2 376 820	1 434 837	0,237
15	Ростов-на- Дону	1125299	3 336,6	591 100	129 800	1 508 000	2 479 720	0,148
16	Рязань	537622	4 888,0	1 700 900	265 200	4 341 329	863 664	0,327
17	Самара	1169719	5 115,6	2 163 911	471 624	8 648 417	1 470 577	0,214
18	Саратов	843460	4 418,0	1 744 432	597 578	4 467 600	1 922 000	0,273
19	Севастополь	428753	2 268,0	26 545	34 629	118 184	549 484	0,040
20	Тольятти	710567	5 115,6	3 882 520	1 481 852	10 174 653	877 944	0,351
21	Томск	572740	6 500,7	1 481 116	347 831	4 505 680	1 024 920	0,268
22	Тула	485221	4 600,0	318 300	305 000	1 420 000	2 902 000	0,074
23	Тюмень	744554	6 221,1	3 088 790	3 900 000	5 919 250	2 636 000	0,361
24	Ульяновск	624518	5 384,8	1 836 000	1 089 000	4 191 000	950 995	0,357
25	Уфа	1130000	5 516,7	2 737 850	2 051 899	8 388 600	3 428 065	0,232
26	Хабаровск	616242	6 018,0	2 367 864	2 421 088	7 021 849	122 835	0,331
27	Челябинск	1198858	5 777,0	2 065 716	1 289 415	9 718 013	2 272 041	0,172
28	Ярославль	608079	6 143,8	1 541 446	458 815	4 109 967	2 010 342	0,252

Однако можно проследить и основную тенденцию в городах с долей покрытия тепловых нагрузок от ТЭЦ, более 60 % – энергоэффективность устойчиво выше (на 10-30 %). На сравнительном графике (Рис/ 2), отражающим суммарные годовые показатели разных городов РФ в такой группе городов (Ряд 2) удалось сохранить долю выработки тепловой энергии на ТЭЦ свыше 60 %.

Не смотря на разные климатические условия (например, Краснодар – ГСОП 2682, Тольятти – 5116, Новосибирск – 6210) за счет значительной доли отпуска тепловой энергии от ТЭЦ, удельная выработка теплофикационной электрической энергии существенно выше, чем в аналогичных климатических условиях, но с меньшей долей отпуска тепла от ТЭЦ (Ростов-на-Дону - для ГСОП 3337 удельная выработка всего 0,148 кВт-ч/Гкал, Самара – при ГСОП 4811, Эуд = 0,214 кВт-ч/Гкал, Красноярск – при ГСОП 6221, Эуд = 0,247 кВт-ч/Гкал).

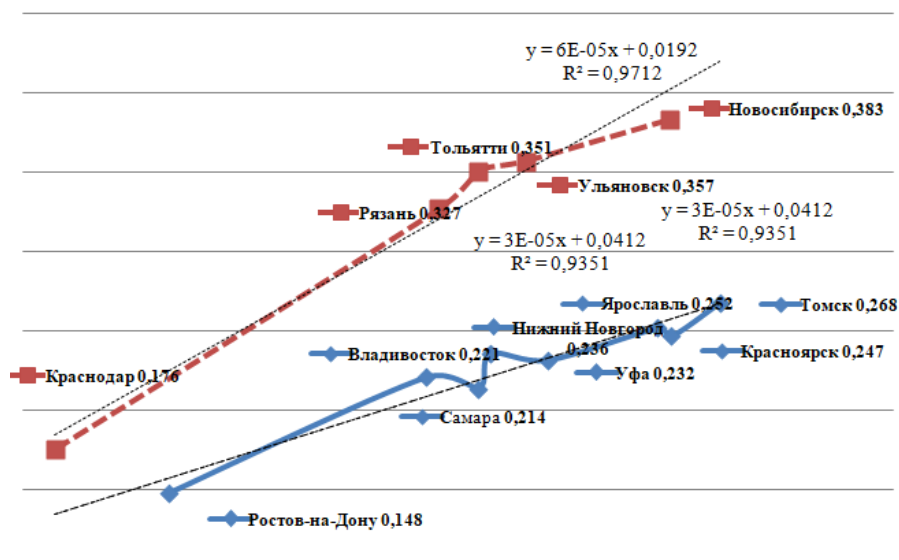


Рис.2. Сравнение энергоэффективности по удельной выработке теплофикационной электроэнергии городов РФ (ряд 2), сохранившим превалирование ТЭЦ (qтэц>60%) в покрытии суммарных тепловых нагрузок города

Сравнение данных по 12 городам подтверждает результативность методики выбора структуры тепловой генерации при разработке схем теплоснабжения городов на перспективу. Применение методики на уровне районов крупного города (Нижнего Новгорода) позволило получить существенные эффекты в энергоэффективности теплоснабжения этих районов путем перенесения тепловых нагрузок с неэффективных котельных на существующую крупную ТЭЦ.

В городах, где сохранено превалирование теплофикации (как по структуре загруженных теплоисточников, так и по структуре отпуска тепловой энергии от ТЭЦ) – уровень топливных затрат на 7-12 % ниже аналогичных систем, которые эксплуатируются в похожих условиях.

Выводы

– Анализ материалов схем теплоснабжения крупных городов России подтвердил тенденцию снижения общей энергетической эффективности теплоснабжения, а – в качестве причины - действие основного фактора: «котельнизации» городов при планировании развития и модернизации источников теплоснабжения.

– На основе анализа практики разработки и реализации мероприятий схем теплоснабжения городов были обоснованы соотношения для анализа энергетической эффективности совокупности систем теплоснабжения городов на предпроектной стадии выбора вариантов развития в схемах теплоснабжения городов. Применение соотношений показало, что снижение доли отпуска тепловой энергии от источников с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии происходит из-за раздельного анализа тепловых и электрических балансов региона.

– Анализ энергетической эффективности источников теплоснабжения в схемах теплоснабжения 28 крупных городов России показал, что в городах, где удалось сохранить превалирование ТЭЦ в покрытии суммарных тепловых нагрузок города (свыше 60 %), удельная теплофикационная выработка электрической энергии на Гкал отпущенной тепловой энергии на 10 - 30 % выше, чем в городах, где этот показатель ниже 50 %.

– С учетом полученных результатов разработана методика выбора структуры тепловой генерации городов, отличающаяся применением дополнительного критерия энергоэффективности (5) и системой учитываемых ограничений по энергетическим балансам региона (7)-(11).

Разработанная методика выбора структуры тепловой генерации апробирована при анализе схем крупных городов РФ. Эффективность на примере районов г. Нижний Новгород составила от 16,5 млн. до 180,0 млн. рублей в год. Применение разработанной методики позволит повысить энергетическую эффективность имеющихся ресурсов ТЭЦ.

Литература

1. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2015-2016 годы. – Информационно-аналитический доклад. М., Минэнерго РФ, 2018.
2. Кикоть Е.А. Эффективность использования топлива в городах РФ (по материалам схем теплоснабжения) // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 3. С.107-114.
3. Пузаков В.С. Анализ разработки и утверждения схем теплоснабжения в Российской Федерации // Новости теплоснабжения, 2015. № 4. С. 4-13.
4. Гашо Е.Г., Пузаков В.С. Схемы теплоснабжения российских городов и реальная жизнь. Новости теплоснабжения. 2020. №2. С. 8-22.
5. Чичирова Н.Д., Ахметова И.Г. Оценка эффективного радиуса систем централизованного теплоснабжения города Казани. Труды Академэнерго. 2016. №1. С. 89-95.
6. Гашо Е.Г., Гужов С.В., Макрушин С.В. Исследование общих закономерностей развития городских энергосистем в различных социально-экономических и природно-климатических условиях. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. №4. С.612-617.
7. Кикоть Е.А., Косяков С.А. Эффективность использования топлива в городах РФ (по материалам схем теплоснабжения) // Энергосбережение – теория и практика, материалы 9 международной школы-семинара молодых ученых и специалистов, Москва, АО «Издательский дом МЭИ». 2018.
8. Сухарева Е., Федюхин А., Кикоть Е. Гибкое распределение затрат между электроэнергией и теплом как фактор повышения конкурентоспособности ТЭЦ) // ИОР Серия конференций: наука о земле и окружающей среде. 2019.
9. Бутко А.А. Необходимость разработки и значимость схем теплоснабжения городов в условиях рыночной экономики. Новости теплоснабжения. 2005. № 11.
10. 65 лет ОАО «Объединение ВНИПИэнергопром» // Новости теплоснабжения. 2007. № 11.
11. Папушкин В.Н., Григорьев А.С., Щербаков А.П. Задачи перспективных схем теплоснабжения. Изменение зон действия источников тепловой энергии (систем теплоснабжения) Новости теплоснабжения. 2013. № 03.
12. Степаненко В.А. Кризис схем теплоснабжения или взлет энергетического планирования-3 // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». Доступно по: (http://esco.co.ua/journal/2012_8/art223.htm). 2012. № 8.
13. Пузаков В.С. Теплоснабжение по-европейски // Новости теплоснабжения. 2008. № 8.
14. Mauthner F., Weiss W. Solar Heat Worldwide. Markets and Contribution to the Energy Supply. 2011 / Solar Heating & Cooling Programme International Energy Agency.
15. Directive 2010/31/EU of European parliament of Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.

Авторы публикации

Кикоть Евгений Александрович – инженер, генеральный директор ООО «Невская Энергетика» (г.Санкт-Петербург).

Газизов Фарит Насибуллович – инженер, доцент кафедры «Экономика и организация производства» (ЭОП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ, г.Казань), технический директор ООО «Невская Энергетика» (г.Санкт-Петербург).

References

1. Heat power and district heating in Russia in 2015-2016. *Information and analytical report*. M., RF Ministry of Energy, 2018.
2. Kikot' EA. Fuel efficiency in cities of the Russian Federation (based on materials from heat supply schemes). *International Technical and Economic Journal*. 2018;3:107-114.
3. Puzakov VS. Analysis of the development and approval of heat supply schemes in the Russian Federation. *News of heat supply*. 2015;4:4-13.
4. Gasho EG, Puzakov VS. Heat supply schemes of Russian cities and real life. *Heat supply news*. 2020;2:8-22.

5. Chichirova ND, Akhmetova IG. Evaluation of the effective radius of district heating systems in the city of Kazan. *Proceedings of Academenergo*, 2016;1:89-95.
6. Gasho EG, Guzhov SV, Makrushin SV. Study of General patterns of development of urban power systems in various socio-economic and natural-climatic conditions. *Proceedings of the Tula state University. Technical Sciences*. 2018;4:612-617.
7. Kikot EA, Kosyakov SA. Efficiency of fuel use in cities of the Russian Federation (based on materials from heat supply schemes). *Energy saving - theory and practice, materials of the 9 international school-seminar for young scientists and specialists*. Moscow. MPEI Publishing House JSC. 2018.
8. Sukhareva E, Fedyukhin A, Kikot E. Flexible allocation of costs between electricity and heat as a factor for improving the CHP competitiveness. *IOP Conference series: earth and environmental science*.
9. Butko AA. The need to develop and the importance of heat supply schemes for cities in a market economy. *News of heat supply*. 2005. N. 11
10. 65 years of OJSC Association VNIPInergoprom. *News of heat supply*. 2007. N. 11
11. Papushkin VN, Grigoriev AS, Shcherbakov AP. Problems of promising heat supply schemes. Changing the coverage areas of heat sources (heat supply systems). *News of heat supply*. 2013. N. 03
12. Stepanenko VA. The crisis of heat supply schemes or the rise of energy planning-3. *Electronic magazine of the energy service company Ecological systems*. Available at: (http://esco.co.ua/journal/2012_8/art223.htm). 2012. N 8.
13. Puzakov VS. Heat supply in a European way. *News of heat supply*. 2008. N. 08
14. Mauthner F, Weiss W. Solar Heat Worldwide. Markets and Contribution to the Energy Supply. 2011. *Solar Heating & Cooling Programme International Energy Agency*.
15. Directive 2010/31/EU of European parliament of Council of 19 May 2010. *On the energy performance of buildings*.

Authors of the publication

Evgeniy. A. Kikot – LLC Nevskaya Energetica, S-Petersburg, Russia. E-mail: eak@nevaenergy.ru.

Farit. N. Gazizov – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia. E-mail: eak@nevaenergy.ru.

Поступила в редакцию

26 октября 2020г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СМОЛИСТЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЩЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

И.Г. Донской

ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>, donskoy.chem@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Оценка условия достаточно глубокого термического разложения смолистых веществ, образующихся при слоевой газификации древесного топлива. МЕТОДЫ. Для этого применяются математические модели в разных постановках: разложение смолы рассматривается в приближениях одно- и двухреакционной кинетической схемы; для оценки влияния размеров слоя и температуры используется уравнение конвекции-диффузии-реакции с заданным распределением температуры по длине реакционной зоны; температура процесса газификации оценивается из экспериментальных данных и термодинамических расчетов. Наряду с численной моделью разложения смолы применена упрощенная аналитическая формула (для больших чисел Пекле), определены границы ее применимости. РЕЗУЛЬТАТЫ. Эффективность процесса воздушной газификации древесины определяется температурным уровнем окислительной стадии: в области режимов, в которых достигается оптимальные значения эффективности, конверсия смолистых продуктов не протекает достаточно полно из-за кинетических ограничений; повышение удельного расхода окислителя приводит к снижению эффективности из-за стехиометрических причин. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Физико-химические ограничения не позволяют достичь предельных значений эффективности газификации, смещая оптимальные режимы в сторону увеличения удельных расходов воздуха; снижение выхода смолы требует, в первую очередь, изменения термических режимов газификации (например, внешнего нагрева или повышения концентрации кислорода).

Ключевые слова: газификация, смола, кинетика разложения, математическое моделирование, термодинамическое моделирование.

Благодарности: Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН в рамках научного проекта П.17.1.2 Программы фундаментальных исследований СО РАН (рег. № АААА-А17-117030310448-0). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Высокотемпературный контур» ИСЭМ СО РАН.

Для цитирования: Донской И.Г. Математическое моделирование термического разложения смолистых веществ в процессе обращенной газификации растительной биомассы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 81-93. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-81-93.

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL DECOMPOSITION OF RESINS IN THE PROCESS OF REVERSED GASIFICATION OF PLANT BIOMASS

IG. Donskoy

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>, donskoy.chem@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Of this work is to estimate parameters for a sufficiently complete thermal decomposition of tarry products of the fixed-bed gasification of wood fuel. METHODS. To this end, mathematical models are used in different statements: the decomposition of the tar is considered in the approximations of one- and two-reaction kinetic

scheme; to assess the influence of the bed height and temperature, the convection-diffusion-reaction equation with a given temperature distribution along the length of the reaction zone is used; the temperature of the gasification process is estimated from experimental data and thermodynamic calculations. Along with the numerical model of the decomposition of the tar, a simplified analytical expression (for large Peclet numbers) is applied, the limits of its applicability are determined. **RESULTS.** Of calculations show that the efficiency of the air-blown gasification of wood is determined by the temperature level of the oxidation stage: in the range of modes in which the optimal values of efficiency are achieved, the conversion of tarry products does not proceed sufficiently completely due to kinetic limitations; an increase in the specific consumption of the oxidizer leads to a decrease in efficiency due to stoichiometric reasons. **CONCLUSION.** Physicochemical limitations do not allow reaching the limiting values of gasification efficiency, shifting the optimal modes towards increasing the specific air consumption; a decrease in the yield of tar requires, first of all, changes in the thermal modes of gasification (for example, external heating or an increase in the oxygen concentration).

Keywords: gasification, tar, decomposition kinetics, mathematical modelling, thermodynamic modeling.

Acknowledgments: The work is performed as a part of scientific project III.17.1.2 of Fundamental Research Program of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (reg. No. AAAA-A17-117030310448-0) using equipment of the multi-access scientific center "High Temperature Circuit".

For citation: Donskoy IG. Mathematical modeling of thermal decomposition of resins in the process of reversed gasification of plant biomass. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):81-93. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-81-93.

Введение

Для установок с газификацией биомассы существуют ограничения на единичную мощность, связанные с экономически эффективным радиусом сбора и транспортировки топлива. С уменьшением мощности усиливается эффект масштаба: для установок мощностью 1 МВт(т) и меньше характерны высокие удельные капитальные и эксплуатационные затраты [1]. Даже при использовании дешевого топлива (биомасса может иметь нулевую стоимость) стоимость энергии не позволяет установкам с газификацией конкурировать с установками на углеводородном топливе и централизованному энергоснабжению [2]. Повышение эффективности и конкурентоспособности таких установок связано в основном с повышением эффективности стадий газификации и очистки газа от смолы. Одной из главных проблем энергетического применения генераторного газа, полученного из биомассы, является его засмоленность. Содержание смолы в газе во многом определяет надежность и экономические характеристики установок с газификацией [3]. В связи с этим разрабатываются способы снижения содержания смолы в газе (например, использование ступенчатых схем, сорбционные/каталитические методы [4, 5] и т.д.).

Среди одноступенчатых (наиболее простых) процессов газификации биомассы широкое распространение получил т.н. обращенный слоевой процесс, в котором топливо после стадий пиролиза и горения образует обширную восстановительную зону. За счет развитой поверхности топливных частиц смола частично сорбируется и разлагается непосредственно в реакционной зоне. Температура в восстановительной зоне, как правило, монотонно падает за счет теплопотерь и эндотермических реакций. В этой связи интересно рассмотреть кинетические условия разложения смолистых веществ, что даст возможность оценить пределы эффективности их конверсии.

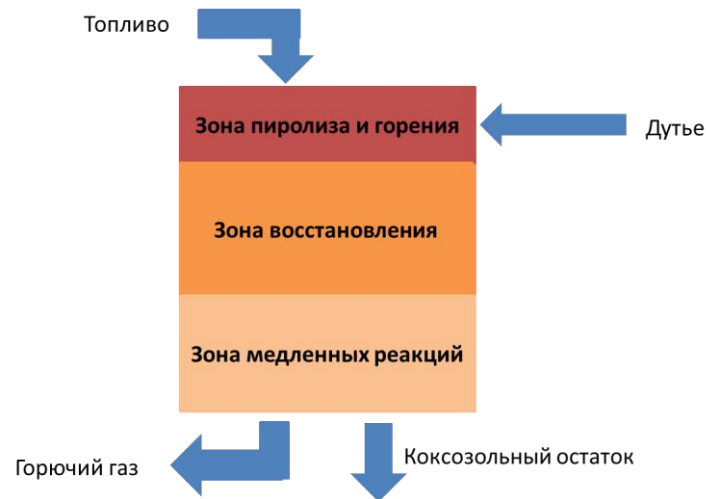


Рис. 1. Схема обращенного слоевого процесса газификации

Материалы и методы

Рассмотрим одномерный стационарный слой топлива после зоны окисления. Скорость движения топлива, как правило, намного меньше скорости газа, поэтому будет считать его неподвижным. Начальная температура слоя соответствует температуре продуктов горения продуктов пиролиза, температура на выходе считается достаточно низкой, чтобы гетерогенные реакции окисления топлива практически не протекали. Поступающий в восстановительную зону поток газа содержит смолистые вещества, которые переносятся с потоком и разлагаются под действием температуры. Давление мало меняется по высоте слоя и принимается всюду равным атмосферному. Тепловой эффект разложения смолы считаем малым по сравнению с другими процессами. Тогда можно записать дифференциальное уравнение баланса массы смолистых веществ в слое:

$$\rho U \frac{dC}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\rho D \frac{dC}{dz} \right) - \rho K(T)C \quad (1)$$

где C – массовая концентрация смолистых веществ в газе; ρ – плотность газа, кг/м^3 ; U – скорость движения газа, м/с ; z – пространственная координата (расстояние от входа газа в зону), м ; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; K – кинетический коэффициент реакции разложения смолистых веществ, $1/\text{с}$; T – температура слоя, К . Начальные и граничные условия записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} C(0) &= C_0 \\ \left. \frac{dC}{dz} \right|_{z=L} &= 0 \end{aligned}$$

где L – высота слоя, м . Кинетический коэффициент в (1) зависит от температуры следующим образом:

$$K = k_0 \exp \left(-\frac{E}{R_g T} \right)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, $1/\text{с}$; E_a – энергия активации, кДж/моль ; R_g – газовая постоянная, Дж/моль/К . Кинетические параметры являются эффективными величинами: они складываются из взаимодействия большого числа элементарных стадий и поэтому оцениваются для некоторого узкого диапазона условий (все еще достаточного, однако, для целей расчета). Коэффициент диффузии зависит от температуры по степенному закону:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n$$

Плотность связана с температурой уравнением состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{PM_g}{R_g T}$$

где M_g – молярная масса газа, кг/моль . Скорость может быть найдена из уравнения непрерывности $\rho U = \text{const}$ (считаем, что гетерогенные реакции протекают без значимого изменения плотности). Распределение температуры считаем заданным. В первом (как

будет показано ниже, достаточно хорошо) приближении можно считать его линейным:

$$T = T_{max} \left(1 - \frac{z}{L} \right) + T_{min} \frac{z}{L}$$

Таким образом, для того, чтобы найти эффективность разложения смолы за счет теплоты процесса, необходимо проинтегрировать линейное дифференциальное уравнение второго порядка (1). Если считать коэффициенты задачи постоянными и использовать некоторые особенности уравнения, можно получить приближенное аналитическое решение. Для более детальных оценок необходимо интегрировать исходное уравнение (1) численно.

Задачу (1) можно привести к безразмерному виду, используя характерные масштабы задачи [6]:

$$\frac{d\varphi}{d\xi} = \frac{1}{Pe} \frac{d^2\varphi}{d\xi^2} - Da\varphi$$

где ξ – безразмерная пространственная координата, z/L ; φ – безразмерная концентрация смолы, C/C_0 ; Pe – диффузионное число Пекле; Da – число Дамкелера, построенное по гидродинамическому времени:

$$Pe = \frac{UL}{D}$$

$$Da = \frac{KL}{U}$$

В таком виде Da и Pe зависят от координаты. Однако скорость газа меняется намного меньше, чем скорость химической реакции, поэтому далее в качестве масштаба скорости используем среднюю скорость течения газа в слое (т.е. скорость течения при средней температуре). Используя разложение Франк-Каменецкого [7], можно представить зависимость K от температуры в виде экспоненциальной функции:

$$K \approx K(T_0) \exp \left(\frac{E(T - T_0)}{RT_0^2} \right)$$

Подставляя сюда линейное распределение температуры и принимая $T_0 = T_{max}$, получаем:

$$K \approx K(T_{max}) \exp \left(\frac{E(T_{min} - T_{max})}{RT_{max}^2} \xi \right) = K(T_{max}) \exp(-Ze\xi)$$

Здесь безразмерный параметр Ze – число Зельдовича, которое характеризует чувствительность скорости реакции к изменению температуры [8]. Таким образом, характерным масштабом скорости реакции является скорость реакции при начальной температуре. Тогда можно записать:

$$\frac{d\varphi}{d\xi} = \frac{1}{Pe} \frac{d^2\varphi}{d\xi^2} - \varphi Da_0 \exp(-Ze\xi)$$

В реальных газогенераторах скорость газа и длина реакционной зоны таковы, что число Pe имеет значения порядка 100-1000. Поэтому с небольшой погрешностью можно пренебречь диффузионным слагаемым и записать обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\varphi}{d\xi} = -\varphi Da_0 \exp(-Ze\xi)$$

Это уравнение элементарно интегрируется, и с учетом начального условия $\varphi = 1$ можно записать:

$$\varphi = \exp \left\{ \frac{Da_0}{Ze} [\exp(-Ze\xi) - 1] \right\} \quad (2)$$

При больших $Ze\xi$ относительная концентрация смолы стремится к постоянному значению $\exp(-Da_0/Ze)$.

Исходное уравнение является линейным, поэтому возможно получить аналитическое решение в квадратурах для полной системы без упрощений. Это, однако, приводит к громоздким формулам, которое не дает большего уровня в понимании по сравнению с приближенным решением. При этом, многие интегралы в точном решении (например, интегральная показательная функция) не могут быть представлены в аналитическом виде, поэтому использование численных методов оказывается неизбежным.

Уравнение (1) может быть приближено системой разностных уравнений [9]:

$$-\frac{(\rho U)_i}{h} C_i + \frac{(\rho U)_{i-1}}{h} C_{i-1} + \frac{(\rho D)_{i-1,i}}{h^2} (C_{i-1} - C_i) + \frac{(\rho D)_{i,i+1}}{h^2} (C_i - C_{i+1}) - \rho_i K_i C_i = 0$$

Такая система может быть решена методом прогонки. Преимуществами численного решения, кроме указанных выше, являются возможность варьировать температурный профиль и учет дополнительных кинетических особенностей разложения смолистых продуктов. Например, наши кинетические расчеты в работе [10] показали, что окисление толуола (который часто рассматривается как модельное соединение смолы [11]) протекает с разными значениями эффективной энергии активации на разных температурных интервалах. Типичный аррениусовский график представлен на рис. 1, из которого видно, что разложение толуола протекает двумя разными кинетическими путями при температурах ниже и выше 1300 К. Низкотемпературное разложение толуола протекает с высокой эффективной энергией активации, характерной для реакций пиролитического распада ароматических соединений. Высокотемпературное разложение протекает с энергией активации порядка 120 кДж/моль, то есть вклад реакций, связанных с окислительным разрушением, увеличивается.

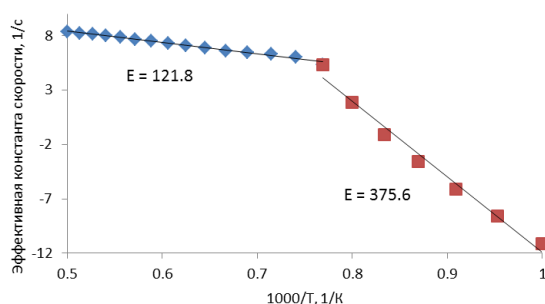


Рис. 1. Аррениусовский график по результатам расчетных экспериментов разложения толуола

Кинетический коэффициент разложения смолистых веществ может быть представлен в виде комбинации двух составляющих:

$$K(T) = \frac{1}{\frac{1}{k_1 e^{-\frac{E_1}{R_g T}}} + \frac{1}{k_2 e^{-\frac{E_2}{R_g T}}}}$$

Переход между разными режимами разложения происходит вблизи 1300 К. Стадия окисления в газогенераторах с воздушным дутьем редко достигает такого уровня температуры. Тем не менее, существуют высокотемпературные процессы, в которых это возможно (например, газификация в фильтрационных режимах горения, с обогащенным дутьем, подогревом воздуха и т.д.). Значения коэффициентов, которые использовались в расчетах, представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Значения коэффициентов в модели		
Величина и обозначение	Размерность	Значение
Давление газа, P	Па	101325
Молярная масса газа, M_g	кг/моль	0.028
Газовая постоянная, R_g	Дж/моль/К	8.314
Коэффициент диффузии при стандартной температуре, D_0	м ² /с	2.69×10^{-6}
Показатель степени n		1.917
Предэкспонент k_1	1/с	1.366×10^{17}
Энергия активации E_1	кДж/моль	375.6
Предэкспонент k_2	1/с	6.9×10^6
Энергия активации E_2	кДж/моль	121.8

Для выбора базовых значений геометрических размеров слоя и скорости газа можно принять данные [12-14] (табл. 2). Результаты расчетов представлены на рис. 2. При использовании формулы (2) параметр Ze рассчитывался по энергии активации E_1 .

Приближенное аналитическое решение недооценивает степень конверсии смолистых продуктов в слое. Это может быть связано с исключением диффузионного члена: в области резких градиентов концентрации, на начальном участке, когда $Pe\xi$ мало, диффузионный поток оказывается значимым; на этом же участке и протекает наиболее интенсивная конверсия смолы. Эта область является «пограничным слоем», в котором сосредоточена погрешность аппроксимации аналитического решения. Эта погрешность, однако, составляет величину всего 2.5% (при этом число $Pe > 8000$).

Таблица 2.

Параметры реакционной зоны			
Источник	[12]	[13]	[14]
Длина реакционной зоны, м	0.24	0.1-0.8	0.5
Начальная скорость газа, м/с	1.17	$0.3(T_{max}/273)$	0.1-0.5
Начальная температура, К	1240	1200-1800	1000-1300
Конечная температура, К	810	600	800

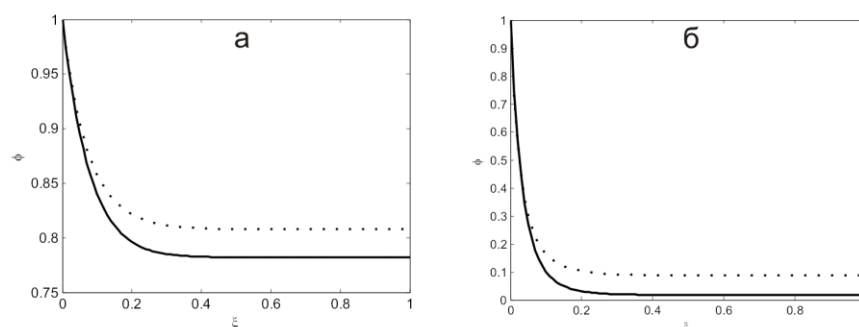


Рис. 2. Расчетная зависимость концентрации смолы от длины реакционной зоны для условий из работы [12]: а – начальная температура 1240 К; б – начальная температура 1400 К. Сплошные линии – численный расчет, пунктирные линии – приближенное аналитическое решение

Конечная конверсия смолы в расчетном примере составляет всего около 20% от начального количества. Как будет показано ниже, это связано с оценкой начальной температуры. Здесь же отметим, что в условиях, типичных для слоевой газификации биомассы, конверсия смолы в слое может быть невысокой, а скорость разложения достаточно быстро затухает по мере удаления от входной границы.

Результаты расчетов и их обсуждение

В работе [15] более подробно обсуждается вопрос о выборе температуры газа, поступающего в восстановительную зону после стадий пиролиза и горения. Прецизионные измерения здесь практически невозможны, в т.ч. и потому, что граница между зонами окисления и восстановления может быть нестационарной (что связано с механическими особенностями движения частиц по мере проседания слоя). На основании подбора нескольких параметров, авторы получают оценку средней температуры – 1400 К. Подставляя это значение в расчет, получаем результаты, представленные на рис. 2. При таких условиях конверсия смолы в слое составляет 98%. Отличия в степени конверсии между численным и аналитическим решением составляет теперь почти 7% (приближенное решение опять недооценивает степень превращения смолы).

Для оценки чувствительности конверсии смолы к начальной температуре были проведены варианты расчетов. На рис. 3 представлены результаты для фиксированной длины реакционной зоны (кривые на рис. 2 являются срезами этой поверхности при соответствующих температурах). Можно увидеть сгущение изолиний в области 1200-1400 К: эта область оказывается критичной для разложения смолы при данных условиях. Длина активной зоны разложения смолистых продуктов для всех случаев составляет порядка 0.2-0.4 L. Результаты расчетов по приближенной формуле (2) приведены на рис. 4а. Результаты приближенных расчетов качественно соответствуют численным, а в области низких температур (примерно до T_{max} 1250 К) даже количественно. С ростом температуры скорость реакции растет, градиент концентрации на начальном участке растет, и диффузионный поток становится более значимым. Тем не менее, абсолютные погрешности все еще невысоки.

Результаты расчетов с варьированием длины реакционной зоны представлены на рис. 4. Длина реакционной зоны оказывается менее значимым параметром по сравнению с температурой, что соответствует нашим экспериментальным данным [16, 17]. Эффект пятикратного увеличения высоты слоя оказывается примерно таким же, как и увеличение начальной температуры менее чем на 100 К. Чувствительность к температуре характерна

для химических процессов, поэтому в данном случае больший интерес представляет определение температурных границ для конкретного процесса. Условия в реакционной зоне можно оценить с помощью термодинамических расчетов.

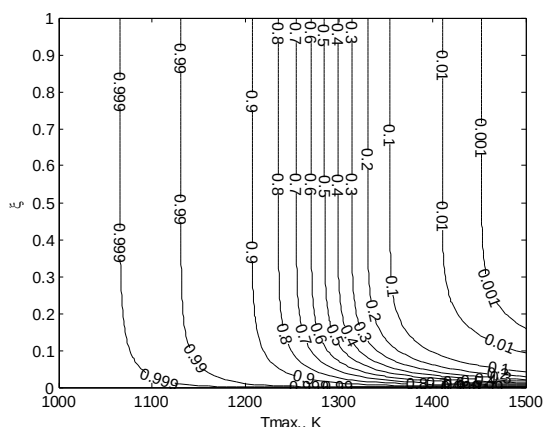


Рис. 3. Зависимость концентрации смолы φ от начальной температуры газа и расстояния от входа в слой

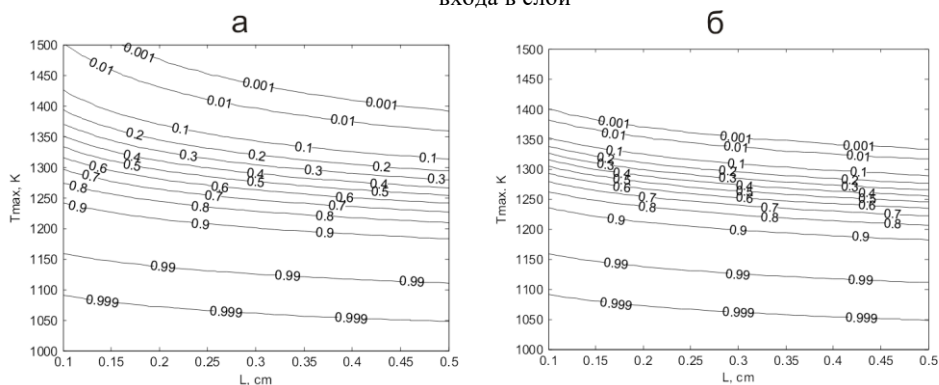


Рис. 4. Зависимость концентрации смолы φ на выходе из слоя от начальной температуры газа и длины реакционной зоны (а – численное решение, б – приближенное аналитическое решение)

Результаты расчетов для других условий газификации биомассы (условия взяты из работ [13, 14]) приведены на рис. Данные [14] описывают низкотемпературные режимы газификации биомассы; в работе [13] даются оценки для высокотемпературного процесса (с внутренней регенерацией теплоты), где температуры зоны горения могут достигать достаточно высоких значений. И в том, и в другом случае концентрация смолы в выходящем газе определяется длиной реакционной зоны и температурой зоны горения. Можно было бы предположить, что для снижения концентрации смолы для условий [14] необходимо снижать скорость газа, т.е. уменьшить расход дутья или увеличить диаметр реактора. Однако, как показывают эксперименты, увеличение расхода, напротив, способствует получению газа лучшего качества (с меньшим содержанием смолы), что связано, в свою очередь, с влиянием скорости дутья на условия в зоне горения. Это влияние не рассматривается в модели (1), поэтому полученные выводы могут оказаться противоречивыми.

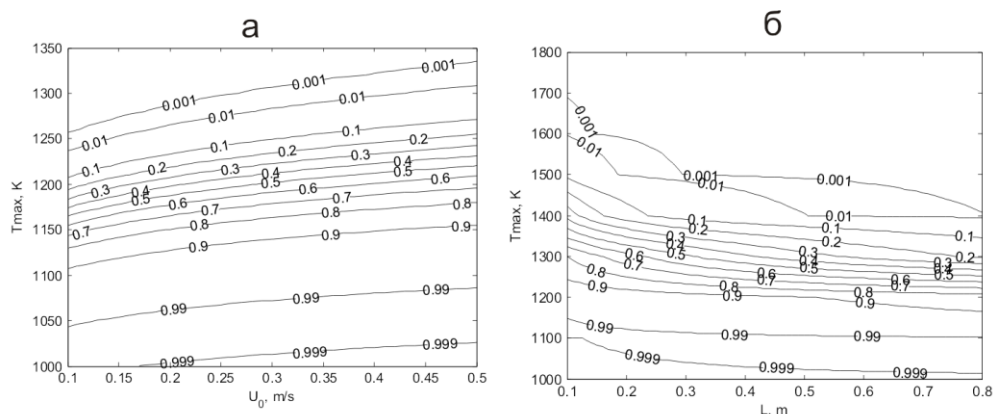


Рис. 5. Зависимость концентрации смолы φ на выходе из слоя от начальной температуры (а) и скорости газа (б) для условий работы [14] (численное решение)

Адиабатической температурой горения называют температуру, которая достигается физико-химической системой в состоянии конечного равновесия (при ограничениях на теплообмен с окружающей средой). При полном сгорании эта температура близка к теоретической температуре горения, при газификации она может быть намного ниже. При постоянной начальной температуре системы адиабатическая температура зависит от соотношения реагентов. На рис. 4 представлена зависимость эффективности процесса газификации древесной биомассы от соотношения топлива и воздуха при разных начальных температурах (начальная температура 200 К моделирует ситуацию с существенными теплотерями). Вместо удельного расхода воздуха на оси абсцисс отложены значения адиабатической температуры: если ограничить диапазон удельного расхода до стехиометрического соотношения, равного единице, то эти величины однозначно определяют друг друга.

На рис. 6а можно увидеть характерную зависимость эффективности газификации от конечной температуры: существует оптимальная температура (оптимальный удельный расход воздуха), при котором эффективность максимальна, и для выбранных значений параметров составляет 80-90%. Реальные процессы сопровождаются потерями (в т.ч. связанными с образованием смолистых продуктов), поэтому достигнутые значения эффективности редко превышают 70%. Поэтому наши оценки необходимо будет уточнить, в т.ч. с учетом известных экспериментальных данных. Например, в работах [16] показано, что экспериментальные режимы газификации в координатах «удельный расход воздуха – теплотерии» часто располагаются вблизи области полной конверсии огарка. Это означает, что удельный расход воздуха не является независимой величиной и определяется особенностями процесса (механической твердостью и просыпанием коксозольного остатка, эффективностью теплоизоляции и т.д.).

Оптимальные значения адиабатической температуры лежат в очень узком интервале 900-1000 К. Можно оценить соответствующие этому диапазону значения температуры горения перед восстановительной зоной. Для этого были проведены термодинамические расчеты процесса газификации с ограничением на выход твердого углеродного остатка, который фиксировался на уровне $(1 - V^{daf})$ от начального количества топлива. Результаты представлены на рис. 6б: в диапазоне расходов 1-3.5 моль воздуха на моль углерода температура в зоне горения превышает конечную температуру на несколько сотен градусов. Температура зоны горения в точке максимальной термодинамической эффективности равна примерно 1390 К: из рис. 4 видно, что при длине реакционной зоны 0,5 м при этом возможна конверсия смолы до 0,1% от начального количества. Слой такой высоты, как правило, не используется в слоевых газогенераторах, поскольку при довольно низких температурах (и, соответственно, низких скоростях гетерогенных реакций) он создает значительное гидравлическое сопротивление из-за увеличения доли мелких фракций по мере выгорания топливных частиц.

Для оценочных расчетов можно выбрать область удельных расходов 1-1,5 где температура зоны горения составляет 1000-1400 К. Предельно достижимое снижение концентрации смолы может быть оценено по формуле (2) для больших $Ze\xi$: результаты расчетов с варьированием конечной температуры представлено на рис. 7. Температура на выходе из слоя зависит от условий теплообмена реакционной зоны с окружающей средой. При температуре в зоне горения порядка 1000-1200 К смолистые продукты практически не разлагаются (см. рис. 3). При снижении температуры на выходе из слоя (высоких теплотерях) концентрация смолы в газе на выходе из слоя ожидаемо растёт.

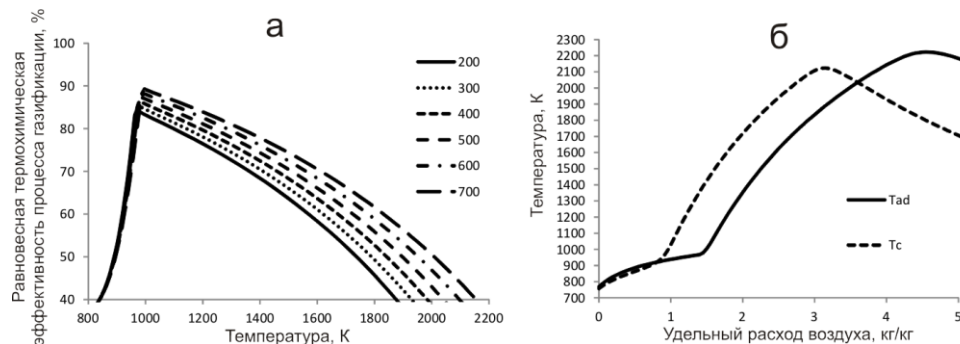


Рис. 6. Зависимость термохимической эффективности процесса газификации от адиабатической температуры (а); зависимость температуры процесса газификации от удельного расхода воздуха (б). T_{ad} – температура конечного равновесия; T_c – температура зоны горения

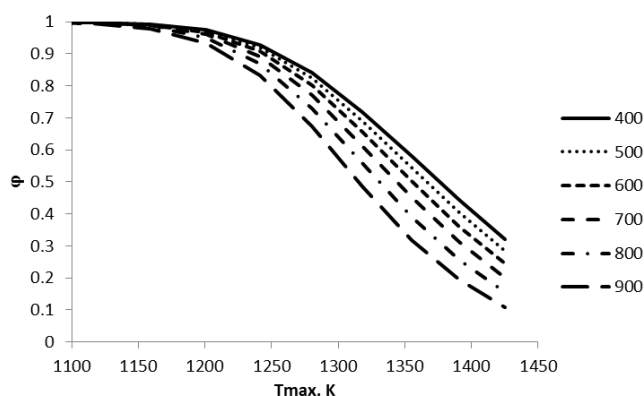


Рис. 7. Зависимость относительной концентрации смолистых продуктов от максимальной температуры в зоне горения (числа на легенде – температура газа на выходе из слоя).

Таким образом, несмотря на то, что термохимическая эффективность газификации биомассы в равновесных условиях достигает значений 80-90%, недостаточно высокая температура процесса не позволяет достичь их из-за низкой конверсии смолистых веществ в реакционной зоне. Повышение температуры газификации может быть достигнуто либо внешним нагревом, либо за счет внутренней энергии процесса, за счет повышения стехиометрического соотношения выше оптимального значения. При этом выход горючих газов неизбежно упадет, однако полученный газ будет содержать меньше смолы.

Заключение

В статье рассмотрен процесс разложения сломы в восстановительной зоне обращенного газогенератора с помощью одномерной стационарной модели. Для аппроксимации скорости реакции разложения применяются одно- и двухстадийная брутто-кинетическая схема. Сопоставлены результаты численного решения и аналитического решения упрощенной задачи (в пределе больших чисел Пекле).

Для ряда конкретных реакторов (по литературным данным) получены расчетные зависимости эффективности конверсии смолы от длины реактора и температуры окислительной зоны. Входящие параметры модели оцениваются с помощью кинетических и термодинамических расчетов.

Эффективность процесса газификации биомассы, как правило, оказывается намного ниже, чем показывают термодинамические оценки. Проведенные расчеты показывают, что при значениях температуры окислительной зоны, которые соответствуют оптимальным равновесным условиям процесса, степень разложения смолы оказывается слишком низкой. Более глубокое разложение смолы требует повышения температуры, что может быть достигнуто только за счет повышения удельного расхода воздуха.

Литература

1. Sansaniwal S.K., Pal K., Rosen M.A., et al. Recent advances in the development of biomass

gasification technology: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 72. pp. 363-384.

2. Marchenko O.V., Solomin S.V., Kozlov A.N., et al. Use of gasifier-based electric power stations for improving the economy of autonomous power supply systems in Russia // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1565. N12077.

3. Reed T.B., Das A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. The Biomass Energy Foundation Press, 1998. 148 p.

4. Heidenreich S., Foscolo P.U. New concepts in biomass gasification // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015. V. 46. pp. 72-95.

5. Донской И.Г. Математическое моделирование газификации древесины смолистых продуктов на частицах активных компонентов // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 107-117.

6. Liu W. Linear reaction-convection-diffusion equation // *Elementary feedback stabilization of the linear reaction-convection-diffusion equation and the wave equation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. pp. 119-214.

7. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: монография. Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2008. 408 с.

8. Clavin P. Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows // *Progress in energy and combustion science*. 1985. V. 11. P. 1-59.

9. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

10. Kozlov A., Svishchev D., Donskoy I., et al. Impact of gas-phase chemistry on the composition of biomass pyrolysis products // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. V. 122, N3. pp. 1089-1098.

11. Bai Z., Nakatsuka N., Hayashi J., et al. Study on inverse diffusion flame formed in combustion field of woody biomass gasification gas // *Proceedings of Grand Renewable Energy 2018 (June 17-22, 2018, Yokohama, Japan)*. Paper O-Bc-1-4.

12. Jayah T.H., Aye L., Fuller R.J., et al. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying // *Biomass and Bioenergy*. 2003. V. 25, N4. pp. 459-469.

13. Салганский Е.А., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б. Моделирование фильтрационного горения твердого пиролизующегося топлива // *Физика горения и взрыва*. 2013. Т. 49. № 1. С. 45-61. https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=148139&ARTICLE_ID=148144.

14. Кейко А.В., Свищев Д.А., Козлов А.Н. Газификация низкосортного твердого топлива: уровень и направления развития технологий. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. 66 с.

15. Babu B.V., Sheth P.N. Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor // *Energy Conversion and Management*. 2006. V. 47. pp. 2602-2611.

16. Svishchev D.A., Kozlov A.N., Donskoy I.G., et al. A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification // *Fuel*. 2016. V. 168. pp. 91-106.

17. Svishchev D.A., Kozlov A.N., Penzik M.V. Unstratified Downdraft Gasification: Conditions for Pyrolysis Zone Existence // *Energy Procedia*. 2019. V. 158. pp 649-654.

Авторы публикации

Донской Игорь Геннадьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

References

1. Sansaniwal SK, Pal K, Rosen MA, et al. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;72:363-84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>.

2. Marchenko OV, Solomin SV, Kozlov AN, et al. Use of gasifier-based electric power stations for improving the economy of autonomous power supply systems in Russia. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1565:012077. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012077>.

3. Reed TB, Das A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. The Biomass Energy Foundation Press, 1998. 148 p.

4. Heidenreich S, Foscolo PU. New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015;46:72-95. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.06.002>.

5. Donskoy IG. Mathematical modelling of wood gasification with tarry products decomposition on active material particles // *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2018;20(11-

12);107-17. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117>.

6. Liu W. Linear reaction-convection-diffusion equation. *Elementary feedback stabilization of the linear reaction-convection-diffusion equation and the wave equation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. pp. 119-214. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04613-1_4.

7. Frank-Kamenetskii DA. *Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics*. monograph. ... Princeton Univ. Press, 2008. 408 p.

8. Clavin P. Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows. *Progress in energy and combustion science*. 1985;11;1-59. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(85\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(85)90012-7).

9. Patankar SV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. NY: Taylor&Francis, 1980. 196 p.

10. Kozlov A, Svishchev D, Donskoy I, et al. Impact of gas-phase chemistry on the composition of biomass pyrolysis products // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015;122(3):1089-98. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4951-z>.

11. Bai Z, Nakatsuka N, Hayashi J, et al. Study on inverse diffusion flame formed in combustion field of woody biomass gasification gas. *Proceedings of Grand Renewable Energy 2018 (June 17-22, 2018, Yokohama, Japan)*. pp. O-Bc-1-4. https://doi.org/10.24752/gre.1.0_203.

12. Jayah TH, Aye L, Fuller RJ, et al. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*. 2003;25(4):459-69. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00037-0).

13. Salganskii EA, Polianchik EV, Manelis GB. Modeling filtration combustion of a pyrolyzing solid fuel. *Combust Explos Shock Waves*. 2013;49:38-52. <https://doi.org/10.1134/S001050821301005X>.

14. Keiko AV, Svishchev DA, Kozlov AN. Gasification of low-grade fuels: state of the art and perspectives of technologies. Irkutsk: MESI SB RAS, 2007. 66 p.

15. Babu BV, Sheth PN. Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor. *Energy Conversion and Management*. 2006;47:2602-11. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.032>.

16. Svishchev DA, Kozlov AN, Donskoy IG, et al. A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification. *Fuel*. 2016;168:91-106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.066>.

17. Svishchev DA, Kozlov AN, Penzik MV. Unstratified Downdraft Gasification: Conditions for Pyrolysis Zone Existence. *Energy Procedia*. 2019;158:649-54. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.177>.

Authors of the publication

Igor G. Donskoy – Senior Researcher in MESI SB RAS, Irkutsk, Russia. Email: donskoy.chem@mail.ru.

Поступила в редакцию

06 ноября 2020г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Р.П. Шпаковский

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,
Дзержинский политехнический институт
г. Дзержинск, Нижегородская обл.,
rst-shp@list.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть стационарную диффузионную задачу при испарении чистой жидкости с плоской поверхности испарения в ламинарный пограничный слой вынужденного газового потока (в отсутствие заглабления поверхности испарения и волнообразования на ней) при числах. В классической модели диффузионной задачи поступления массы с плоской поверхности в ламинарный пограничный слой учитывается лишь возникающий при этом дополнительный подтормаживающий эффект. Однако получающееся решение не отвечает общему случаю испарения, поскольку при этом массоперенос может существенно зависеть от тепловой обстановки задачи, сопряжённой по фазам; в критериальной форме это обстоятельство выражается появлением дополнительного параметра. Отметим, что указанный параметр связан с величиной производной относительной концентрации по поперечной координате на поверхности испарения. В ходе предлагаемого решения температура поверхности испарения и соответственно величина этого параметра принимались постоянными. МЕТОДЫ. При решении задачи использовались численные приближённые методы интегрирования уравнения диффузии (метод Эйлера, метод интегро-дифференциального уравнения, а также метод последовательных приближений). При этом подтормаживающее действие потока пара с поверхности фазового перехода полагали для нашего случая сравнительно незначительным (что соответствовало экспериментальным данным, использовавшимся в [1-3]). РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье анализируется известное классическое решение уравнения диффузии по модели Хартнетта - Эккерта и отмечается, что получаемый в этой модели результат не отвечает общему случаю испарения, когда массоотдача в газовой фазе зависит также от комплекса. На основе решения, полученного в нашей работе, приходим к выводу, что действие указанного параметра проявляется в увеличении толщины диффузионного пограничного слоя. Кроме того, этот эффект связан также со значением продольной координаты, являясь более заметным при её малых значениях. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Указанную картину испарения физически можно объяснить относительно большим количеством испаряемого вещества, нежели в "стандартном" случае поскольку представленные значения в свою очередь связаны с более высокими значениями температуры поверхности испарения. Можно также полагать, что в области газового потока, непосредственно примыкающей к поверхности испарения, указанные факторы проявляют себя схожим образом и в случае турбулентных течений.

Ключевые слова: испарение, диффузия, пограничный слой, тепло-массоперенос.

Для цитирования: Шпаковский Р.П. Исследование испарения в пограничный слой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 5. С.94-106. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-94-106.

INVESTIGATION OF THE EVAPORATION IN THE BOUNDARY LAYER

RP. Shpakovskii

Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseev,
Dzerzhinsk
Polytechnic Institute, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region,
rst-shp@list.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider a stationary diffusion problem when a pure liquid evaporates from a flat surface of evaporation into a laminar boundary layer of a forced gas flow (in the absence of deepening of the evaporation surface and wave formation on it) at the number. In the classical model of the diffusion problem of the flow of mass from a flat surface into the laminar boundary layer, only the additional slowing down effect arising in this case is taken into account. However, the resulting solution does not correspond to the general case of evaporation, since in this case the mass transfer can significantly depend on the thermal conditions of the problem, conjugate in phases; in criterion form, this circumstance is expressed by the appearance of an additional parameter [1-3]. Note that this parameter is related to the value of the derivative of the relative concentration along the transverse coordinate on the evaporation surface. In the course of the proposed solution, the temperature of the evaporation surface and, accordingly, the value of this parameter were taken constant. *METHODS.* When solving the problem, we used approximate numerical methods for integrating the diffusion equation (Euler's method, integro-differential equation method, and also the method of successive approximations). In this case, the retarding effect of the vapor flow from the surface of the phase transition was assumed to be relatively insignificant in our case (which corresponded to the experimental data used in [1-3]). *RESULTS.* The article analyzes the well-known classical solution of the diffusion equation according to the Hartnett - Eckert model and notes that the result obtained in this case does not correspond to the general case of evaporation, when the mass transfer in the gas phase also depends on the complex. Based on the solution obtained in our work, we come to the conclusion that the effect of this parameter manifests itself in an increase in the thickness of the diffusion boundary layer. In addition, this effect is also associated with the value of the longitudinal coordinate, being more noticeable at its small values. *CONCLUSION.* The indicated evaporation pattern can be physically explained by a relatively larger amount of evaporated substance than in the "standard" case (since values, in turn, are associated with higher values of the evaporation surface temperature). It can also be assumed that in the region of the gas flow immediately adjacent to the evaporation surface, these factors manifest themselves in a similar way in the case of turbulent flows.

Key words: evaporation, diffusion, boundary layer, heat--mass transfer.

For citation: Shpakovskii RP. Investigation of the evaporation in the boundary layer. Power engineering: research, equipment, technology.2020;22(5):94-106. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-94-106.

Введение и литературный обзор

В работах [1-3] на полуэмпирической основе показано, что в общем случае испарения критериальное уравнение массоотдачи в газовой фазе содержит комплексный критерий Dk/Le_f^n , где

$$Dk = \frac{(r + q_{\text{ж}}/j)}{T_f - T_w} \cdot \frac{c_{1w} - c_{1f}}{c_{2w}} \left(\frac{D\rho}{\lambda} \right)_f ; Le = Pr/Sc = D\rho c_p / \lambda ; r - \text{удельная теплота}$$

испарения; $q_{\text{ж}}$ - плотность потока тепла от поверхности испарения в жидкую фазу; D -коэффициент взаимной диффузии; ρ -плотность; c - концентрация (мас. доля) компонента; T - температура; λ - коэффициент теплопроводности; c_p - удельная изобарная теплоёмкость газовой фазы; y - поперечная координата, отсчитываемая от поверхности

испарения и направленная в газовую фазу; $j = - \left(\frac{D\rho}{c_2} \frac{\partial c_1}{\partial y} \right)_w$ - плотность потока массы

пара от поверхности испарения. Индексы: 1 – пар испаряющейся жидкости; 2 – второй («инертный») компонент парогазовой смеси; w – состояние газовой фазы на поверхности испарения; f – основной газовый поток.

Приводимые в [1-3] результаты основываются в том числе на обработке с использованием комплекса Dk/Le_f^n экспериментальных данных ряда авторов по пористому испарению различных жидкостей в газовый (воздушный) поток при подводе тепла к поверхности испарения от газовой фазы. Это данные Исаченко – Взорова (Московский энергетический институт) по испарению воды в щелевидный канал прямоугольного сечения, данные Фёдорова по испарению воды и Вайнберг по испарению этанола, ацетона и бензола (Институт тепло- и массообмена АН БССР) в аэродинамической трубе и наши данные по испарению воды, ацетона и этанола с поверхности плоского переходного элемента трубопровода (а также сублимации в тех же условиях нафталина и дифенила).

Эти данные в целом соответствуют турбулентным течениям, при отсутствии волнообразования на поверхности, а также отсутствию заглупления самой поверхности испарения.

Для всех указанных данных вне зависимости от гидродинамических и геометрических условий обтекания поверхности испарения было получено следующее соотношение, описывающее массоотдачу в газовой фазе:

$$Nu_{mc_{2w}} / (Nu_{mc_{2w}})_0 = (Dk / Le_f^n)^{-1}, \quad (1)$$

где комплексный параметр Dk/Le_f^n принимал значения от единицы до немногим более двадцати; число Нуссельта для массоотдачи $Nu_m = \frac{j l}{(Dp)_f (c_{1w} - c_{1f})}$; l – характерный (определяющий) размер; показатель n в [1-3] принимался равным 0,4; индекс “0” отвечает “стандартным” условиям процесса, т.е. таким, при которых $Dk/Le_f^n = 1$ и соответственно будет иметь место подобие критериальных зависимостей тепло- и массоотдачи, имеющее в достаточно общем случае вид:

$$Nu_0 = A_0 Re^m Pr^n Gr^p \Psi, \quad (2)$$

$$(Nu_{mc_{2w}})_0 = A_0 Re^m Sc^n Gr^p \Psi; \quad (3)$$

при этом число Нуссельта для теплоотдачи $Nu = \frac{q l}{\lambda_f (T_f - T_w)}$; q – плотность потока

тепла от газовой фазы к поверхности испарения; Re , Pr , Sc , Gr – критерии соответственно Рейнольдса, Прандтля, Шмидта и Грасгофа; Ψ – фактор совместного тепломассопереноса, дополнительный к обычным числам подобия и одинаково влияющий на безразмерные функции Nu и $Nu_{mc_{2w}}$ (например, через параметр поперечного потока вещества $b = \frac{j}{(\alpha/c_p)_{j \rightarrow 0}}$; при $\Psi = 1$ об уравнениях (2), (3) можно говорить соответственно как о

зависимости для чистой теплоотдачи и соответствующей ей аналогии массоотдачи);

α – коэффициент конвективной теплоотдачи от газового потока к обтекаемой поверхности.

Для уравнений (1)–(3) подразумевается, что вне зависимости от условий на поверхности испарения числа Nu , $Nu_{mc_{2w}}$ и $(Nu_{mc_{2w}})_0$ соответствуют одинаковым условиям в основном газовом потоке (эти условия приняты за определяющие); в критериальных формулах одинаковы значения показателей степени m , n , p для соответствующих определяющих чисел подобия.

Экспериментальные данные, лёгшие в основу соотношения (1), по поверхности испарения обрабатывались по средним для этой поверхности величинам. В качестве определяющего размера при этом использовался либо продольный размер всей плоской поверхности, либо – в наших опытах – диаметр подводящего трубопровода. Соотношение (1) в [1-3] соответствует значениям параметра $b \leq 0,1$.

Из соотношения (1) вытекает, что в совместном процессе тепло- массопереноса имеет место отступление от подобия процессов тепло- и массоотдачи в газовой фазе, характеризуемое величиной комплекса Dk/Le_f^n .

Что же касается собственно теплоотдачи, то при значении $\Psi = 1$ она оказывается соответствующей случаю «чистого» теплообмена (что практически отвечает значениям $b \leq 0,1$).

Физически указанные обстоятельства обусловлены тем, что задача испарения в целом является сопряжённой по фазам и её характер в общем случае определяется также тепловыми, гидродинамическими и геометрическими условиями в жидкой фазе [1-3]. В свою очередь последние оказывают непосредственное влияние на условия на фазовой границе, отвечающие за массоотдачу.

С учётом выражений для плотности потока массы пара от поверхности испарения j и диффузионного числа Нуссельта Nu_m и с введением относительной переменной $\tilde{c}_1 = (c_1 - c_{1w}) / (c_{1f} - c_{1w})$ выражение (1) можно представить через отношение производных:

$$\frac{(\partial \tilde{c}_1 / \partial y)_w}{(\partial \tilde{c}_1 / \partial y)_{w,0}} = (Dk / Le_f^n)^{-1} \frac{(D\rho)_{w,0}}{(D\rho)_w} = \zeta. \quad (4)$$

Далее будем полагать величину «стандартной» производной относительной концентрации $(\partial \tilde{c}_1 / \partial y)_{w,0}$ известной; она соответствует хорошо изученным данным. Тогда

соотношение (4) при заданной величине параметра ζ вместе с условием $\tilde{c}_{1w} = 0$ можно рассматривать в качестве начальных (при $y=0$) условий задачи.

В дальнейшем рассмотрении, относящемся к продольному обтеканию ламинарным газовым потоком плоской поверхности испарения, будет предполагаться, что соотношение (4) действительно также в этом случае.

При $y \rightarrow \infty$ концентрация пара в газовом потоке равна c_{1f} , а относительная концентрация $\tilde{c}_{1f} = 1$; в модели пограничного слоя конечной толщины эти концентрации будут соответствовать внешней границе диффузионного пограничного слоя.

В [4] вопрос о характере профиля концентраций при ламинарном обтекании плоской поверхности испарения при числах $Dk / Le_f^n \geq 1$ решался нами с использованием методологии Кармана–Польгаузена: а именно, для диффузионного пограничного слоя конечной толщины подбирались полиномиальные распределения, удовлетворяющие граничным условиям. Принималось, что значение параметра поперечного потока вещества b не превышает значения 0,1; соответственно считалось, что влияние поступления массы с поверхности испарения на структуры пограничных слоёв несущественно. При этом также предполагалось, что отличия в размерах скоростного (динамического) и концентрационного (диффузионного) пограничных слоёв определяются лишь значениями числа Шмидта $Sc = \nu / D$ и при $Sc = 1$ толщины указанных слоёв являются одинаковыми (ν - кинематический коэффициент вязкости).

В методологии Кармана–Польгаузена, однако, отсутствует постановка вопроса о том, насколько полученное таким образом распределение соответствует самому дифференциальному уравнению, для которого ищется решение.

Сами авторы метода решали чисто гидродинамическую задачу обтекания пластинки вынужденным ламинарным потоком, и полученные ими результаты хорошо согласуются как с более точным решением Блазиуса, так и с последующими прямыми экспериментами [5,6]).

Настоящее исследование связано именно с решением дифференциального уравнения диффузии при указанных нами выше граничных условиях.

Проведённый анализ литературных источников показал, что в работах по испарению [7 - 15, и др.] этот вопрос не затрагивался.

Чтобы были лучше понятны особенности решения, возникающие при числах $Dk / Le_f^n > 1$, целесообразно предварительно остановиться также на подходе, известном как модель Хартнетта – Эккерта, тем более, что на указанную модель имеются ссылки во многих работах по испарению.

О классическом решении уравнения диффузии в модели Хартнетта - Эккерта

В классических моделях дифференциальное уравнение импульсов в пограничном слое при вынужденном ламинарном обтекании газовым потоком плоской поверхности имеет вид:

$$V_x \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 \tilde{V}_x}{\partial y^2}, \quad (5)$$

где V_x, V_y – компоненты (проекции) скорости; x – продольная координата; U – скорость на внешней границе динамического (скоростного) пограничного слоя; $\tilde{V}_x = V_x/U$ – безразмерная продольная скорость. Плотность газа ρ и его кинематический коэффициент вязкости ν принимают постоянными.

В модели Блазиуса (и следующих ей моделях асимптотического пограничного слоя, в том числе модели Хартнетта – Эккерта) для поперечной координаты используется в качестве масштабной величины комплекс $(\nu x/U)^{1/2}$. Значения $\tilde{V}_x$ и безразмерного комплекса $\frac{V_y}{U} \sqrt{\frac{Ux}{\nu}}$, а также производные компонент скорости, являются при этом

функциями обобщённой координаты $\eta \equiv y \left(\frac{U}{\nu x} \right)^{1/2} = \frac{y}{x} \sqrt{\frac{Ux}{\nu}}$, причём η не только служит безразмерным представлением поперечной координаты y , но и соответствующим образом зависит от продольной координаты x :

$$\frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial \eta} \left(-\frac{1}{2} \frac{y}{x} \sqrt{\frac{U}{\nu x}} \right) = -\frac{1}{2} \frac{\eta}{x} \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial \eta}. \quad (6)$$

При этом имеет место также вполне определённое соотношение между производными продольной скорости по размерным координатам:

$$x \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial x} = -\frac{1}{2} y \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial y}. \quad (7)$$

В монографии [16], где классическое решение уравнения (5) подробно анализируется с позиции теории подобия, отмечено, что, строго говоря, сам процесс в этом случае не является автомодельным, однако применённым способом преобразования переменных удаётся прийти “к системе уравнений [имеются в виду дифференциальные уравнения импульсов и непрерывности], которые связывают между собой только безразмерные переменные и не включают никаких параметров” (имеется в виду число Рейнольдса). Благодаря этому, также становится возможным и само получаемое решение представить в инвариантной (автомодельной) форме).

В модели Хартнетта – Эккерта [17] дифференциальное уравнение диффузии записывается аналогично уравнению (5):

$$V_x \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} + V_y \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} = D \frac{\partial^2 \tilde{c}_1}{\partial y^2}, \quad (8)$$

при этом плотность парогазовой смеси ρ и коэффициент диффузии D также принимаются постоянными.

Аналогичным образом в решении используется и комплекс $(\nu x/U)^{1/2}$. Выражения для производных относительной концентрации оказываются при этом тоже аналогичными выражениям (6), (7).

Соответствующее представление используется также для дифференциального уравнения энергии.

Граничные условия для относительных величин продольной скорости, температуры и концентрации записываются в [17] также в симметричной форме (в том числе значения указанных безразмерных величин равны нулю на всей обтекаемой поверхности). Принималось также известное положение, что автомодельные решения имеют место только тогда, когда скорость поступления массы с поверхности $(V_y)_w$ пропорциональна $\sqrt{\frac{\nu U}{x}}$.

Решение Хартнетта – Эккерта зависит от скорости поступления массы с обтекаемой поверхности. При заданных условиях решения всех трёх дифференциальных уравнений (импульсов, энергии и диффузии) становятся в безразмерной форме аналогичными; в том числе производная $(\partial \tilde{c}_1 / \partial \eta)_w$ определена лишь безразмерной скоростью поступления массы со стенки.

Но дополнительно имеет место также вполне определенное соотношение между концентрацией в основном газовом потоке c_{1f} , на обтекаемой поверхности c_{1w} , безразмерной скоростью поступления массы с поверхности $\frac{(V_y)_w}{U} \sqrt{\frac{Ux}{\nu}}$ и производной $(\partial \tilde{c}_1 / \partial \eta)_w$. Это соотношение вытекает из выражения для плотности поперечного потока массы на обтекаемой “полупроницаемой” поверхности (закона Стефана). В целом это создаёт вполне определённую связь указанных выше величин, которую можно считать соответствующей случаю вдувания газов через пористую стенку в основной газовый поток.

Но приводимое в [17] решение уравнения диффузии не отвечает общему случаю испарения, когда массоотдача в газовой фазе зависит также от комплекса Dk/Le_f^n , отражающего сопряжённый по фазам характер задачи.

Методы

Решение диффузионной задачи испарения в ламинарный пограничный слой при числах $Dk/Le_f^n > 1$

Переходя к решению уравнения диффузии (8) при числах $Dk/Le_f^n > 1$ (“стандартный” случай $Dk/Le_f^n = 1$ является предельным), для модели с асимптотическими пограничными слоями положим, что комплекс $(\nu x/U)^{1/2}$ и в этом случае допустимо рассматривать в качестве масштаба для поперечной координаты y .

Уравнение диффузии запишем в форме [18]:

$$\frac{x \cdot V_x}{U} \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} + \frac{V_y}{U} \sqrt{\frac{Ux}{\nu}} \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \eta} = \frac{1}{Sc} \frac{\partial^2 \tilde{c}_1}{\partial \eta^2}, \quad (9)$$

где η соответственно играет роль безразмерной поперечной координаты.

При решении уравнения (9) далее используем условие (4) на поверхности испарения, т.е. $(\partial \tilde{c}_1 / \partial y)_w = \zeta (\partial \tilde{c}_1 / \partial y)_{w,0}$; и соответственно $(\partial \tilde{c}_1 / \partial \eta)_w = \zeta (\partial \tilde{c}_1 / \partial \eta)_{w,0}$.

Принимаем, что параметр ζ - величина заданная и постоянная по обтекаемой поверхности. Значения безразмерных (относительных) величин продольной скорости, температуры, концентрации равны нулю на всей обтекаемой поверхности.

Далее рассматриваем интегрирование уравнения диффузии при значении параметра $b < 0,1$, т.е. в области относительно малых величин $(V_y)_w$.

Для интегрирования уравнения (9) при заданных условиях используем численный пошаговый метод Эйлера:

$$\left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \eta} \right)_{\eta+\Delta\eta} = \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \eta} \right)_{\eta} + Sc \left(x \tilde{V}_x \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} + \frac{V_y}{U} \sqrt{\frac{Ux}{\nu}} \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \eta} \right)_{\eta} \Delta\eta,$$

начиная интегрирование от поверхности испарения (т.е. от координаты $\eta = 0$).

И также пошагово вычисляем значения $\tilde{c}_1$.

В «стандартном» случае получаем известное решение. При $\zeta < 1$ возникает вопрос о поведении производной $\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x}$. Было принято, используя сформулированные выше краевые условия, осуществлять подбор зависимости этой производной от параметра ζ , чтобы обеспечивалось их выполнение.

Если при значении $\zeta = 1/2$ принять, что

$$x \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} = -\frac{1}{2} y \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} \zeta, \quad (10)$$

и соответственно,

$$x \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} = -\frac{\zeta}{2} \eta \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \eta} \quad (11)$$

(производные в этих выражениях отвечают фактическим значениям данной задачи), то, интегрируя соответственно сказанному выше, а также принимая (здесь и далее) $Sc=1$, получаем практически линейный профиль $\tilde{c}_1$ вплоть до значений $\eta = 3 \dots 3,5$. При $\eta = 6$

значение $\tilde{c}_1 = 0,94$, а величину $\eta = 6,3$ можно принять отвечающей толщине δ_c диффузионного пограничного слоя.

Поскольку значения $(V_y)_w$ сравнительно малы, то для величин $\tilde{V}_x$ и $\frac{(V_y)_w}{U} \sqrt{\frac{Ux}{\nu}}$ в этом расчёте могут быть приняты значения, отвечающие классической задаче по модели Блазиуса. При этом также: $(\partial \tilde{c}_1 / \partial \eta)_{w,0} = (\partial \tilde{V}_x / \partial \eta)_{w,0} = (\partial \tilde{V}_x / \partial \eta)_w$.

Принимая, что в задаче Блазиуса толщина скоростного (и “стандартного” диффузионного при $Sc=1$) пограничных слоёв δ соответствует значению $\eta \cong 5$, получаем при $\zeta = 1/2$ отношение $\beta = \delta_c / \delta = 6,3/5 = 1,26$.

Если в соответствии с рассматриваемой методикой выражение (11) использовать при величинах ζ , меньших $1/2$, то значения $\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x}$ оказываются заниженными по модулю, что выражается, в частности, в несогласованном выполнении краевых условий на внешней границе диффузионного пограничного слоя. (В этом плане возможна коррекция выражения (11), если, например, вместо линейной зависимости от ζ ввести в (11) более сложную функцию.)

В то же время сама тенденция увеличения поперечного размера диффузионного пограничного слоя (а также увеличения размера его линейной части) по мере уменьшения ζ является вполне очевидной. Значения $\beta = \delta_c / \delta$ могут при этом определяться по приближённым формулам:

$$\beta \cong \zeta^{-1/3} \text{ при } 1 \geq \zeta \geq 1/2, \quad (12a)$$

$$\beta \cong 1,05 \left[\zeta (\delta_c / \delta_{усл})_0 \right]^{-1} = 0,63 \zeta^{-1} \text{ при } \zeta \leq 1/2, \quad (12b)$$

где $(\delta_c / \delta_{усл})_0$ представляет собой для “стандартных” условий и $Sc=1$ отношение толщины диффузионного пограничного слоя, равного примерно пяти в единицах η , к толщине в том же случае условного пограничного слоя, что соответствует $\eta \cong 3$; коэффициент 1,05 играет роль поправочного, учитывающего фактическое дополнительное увеличение размера диффузионного пограничного слоя.

Для уточнения вопроса были рассмотрены также другие методы, а именно непосредственно связанные с понятием пограничного слоя конечной толщины.

Предполагая, что профили относительной концентрации могут быть представлены в форме $\tilde{c}_1 = \tilde{c}_1(\tilde{y}_c)$, где $\tilde{y}_c = y / \delta_c$, $\delta_c = \delta_c(x)$, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} &= \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \cdot \frac{\partial \tilde{y}_c}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \cdot \frac{1}{\delta_c}, \\ \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} &= \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \cdot \frac{\partial \tilde{y}_c}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \cdot \frac{\partial \tilde{y}_c}{\partial \delta_c} \cdot \frac{d\delta_c}{dx} = \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \left(-\frac{y}{\delta_c^2} \right) \frac{d\delta_c}{dx} \\ \text{и} \quad \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} &= \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} \left(-\frac{y}{\delta_c} \right) \frac{d\delta_c}{dx}. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом, если β зависит от продольной координаты, то тогда

$$\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} = -\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} \cdot \frac{y}{\beta \delta} \left(\beta \frac{d\delta}{dx} + \delta \frac{d\beta}{dx} \right) = -\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} y \left(\frac{d\delta}{\delta dx} + \frac{d\beta}{\beta dx} \right). \quad (14)$$

Запишем интегральное уравнение диффузионного пограничного слоя [18]:

$$d \left(\int_0^{\delta_c} V_x (c_1 - c_{1f}) dy \right) / dx + (V_y)_w (c_{1f} - c_{1w}) = -D (\partial c_1 / \partial y)_w.$$

С использованием относительных величин продольной скорости и концентраций, а также связи $j = (\rho V_y)_w$, это уравнение запишется в виде

$$U \frac{d}{dx} \int_0^{\delta_c} \tilde{V}_x (1 - \tilde{c}_1) dy = \frac{c_{2f}}{c_{2w}} D \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} \right)_w. \quad (15)$$

Для приближённого представления относительной концентрации $\tilde{c}_1$ используем метод Бернштейна. По этому методу приближающий многочлен n -ой степени для непрерывной функции на отрезке $[0, 1]$ выглядит как

$$B_n(\tilde{y}_c) = \sum_{m=0}^n \varphi(m/n) C_n^m \tilde{y}_c^m (1 - \tilde{y}_c)^{n-m},$$

где C_n^m - биномиальные коэффициенты; $\varphi(m/n)$ - значение данной функции в точке $\tilde{y}_c = m/n$.

Ограничимся многочленом третьей степени, тогда

$$\begin{aligned} \tilde{c}_1 \equiv B_3(\tilde{y}_c) = & \varphi(0) C_3^0 \tilde{y}_c^0 (1 - \tilde{y}_c)^3 + \varphi(1/3) C_3^1 \tilde{y}_c^1 (1 - \tilde{y}_c)^{(3-1)} + \\ & + \varphi(2/3) C_3^2 \tilde{y}_c^2 (1 - \tilde{y}_c)^{(3-2)} + \varphi(1) C_3^3 \tilde{y}_c^3 (1 - \tilde{y}_c)^{(3-3)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Используем краевые условия: $\varphi(0) \equiv \tilde{c}_1(0) = 0$, $\varphi(1) \equiv \tilde{c}_1(1) = 1$. В условии (4) необходимо перейти к поперечной координате, отнесённой к толщине диффузионного пограничного слоя в данном поперечном сечении:

$$\left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \right)_w \cdot \frac{1}{\delta_c} = \zeta \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \right)_{w,0} \frac{1}{\delta_{c,0}}; \quad \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \right)_w = \zeta \beta \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \right)_{w,0},$$

где $\delta_{c,0}$ - толщина диффузионного пограничного слоя в “стандартных” условиях; (равняется толщине динамического пограничного слоя: $\delta_{c,0} = \delta$, поскольку также принято, что число Шмидта равно единице).

Полагая, что при не очень больших значениях $\tilde{y}_c$ профиль концентраций близок к линейному, а величина “стандартной” производной $(\partial \tilde{c}_1 / \partial \tilde{y}_c)_{w,0}$ соответствует “стандартному” распределению относительной концентрации по кубической параболе, принимаем $\varphi(1/3) C_3^1 = 1,5\zeta$.

В многочлене (16) необходимо определить ещё величину $\varphi(2/3) C_3^2$, для этого, с учётом сказанного здесь, выражая из (16) производную $\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c}$, имеем:

$$\text{при } \tilde{y}_c = 0 \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} \right)_w = 1,5\zeta\beta; \quad \text{при } \tilde{y}_c = 1 \quad \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial \tilde{y}_c} = -\varphi(2/3) C_3^2 + 3 = 0, \text{ откуда } \varphi(2/3) C_3^2 = 3.$$

В итоге можно представить

$$\begin{aligned} \tilde{c}_1 = & 1,5\zeta\beta\tilde{y}_c(1 - \tilde{y}_c)^2 + 3\tilde{y}_c^2(1 - \tilde{y}_c) + \tilde{y}_c^3 = \\ = & 1,5\zeta\beta\tilde{y}_c + 3\tilde{y}_c^2(1 - \zeta\beta) - 2\tilde{y}_c^3(1 - 0,75\zeta\beta). \end{aligned} \quad (17)$$

Если положить $\zeta = 1$ и, соответственно, $\beta = 1$ (“стандартный” случай при $Sc=1$), то из (17) получим известную приближённую зависимость относительной концентрации от относительной координаты $\tilde{y}_c$, отвечающую этому случаю.

Выражение (17) даёт некое совместное действие на распределение $\tilde{c}_1$ объединённого параметра $\zeta\beta$. Если связь ζ и β соответствует (12б), то в относительной форме $\tilde{c}_1 = \tilde{c}_1(\tilde{y}_c)$ она становится для этого случая универсальной (причём, как наглядно видно из графического представления, несильно отличающейся от «стандартного» случая).

(Но при рассмотрении зависимости $\tilde{c}_1$ от размерной поперечной координаты надо учитывать, что при этом изменяется величина самого диффузионного пограничного слоя.)

Распределение относительных концентраций (17) далее подставлялось в интегро-дифференциальное уравнение (15). Для безразмерной (относительной) продольной скорости $\tilde{V}_x$ при $\delta_c \leq \delta$ принималось распределение ($b \leq 0,1$):

$$\tilde{V}_x = 1,5\tilde{y} - 0,5\tilde{y}^3, \quad (18)$$

где $\tilde{y} = y/\delta$; и как более точно соответствующее ему представление для толщины скоростного пограничного слоя $\delta \cong 4,64 \sqrt{vx/U}$; также соответственно в ходе решения использовалось известное выражение:

$$\delta \frac{d\delta}{dx} = \frac{140}{13} \frac{v}{U}.$$

При $\delta_c \geq \delta$ безразмерная скорость $\tilde{V}_x = 1$.

В рассматриваемом расчете также принималось $c_{2f}/c_{2w} \approx 1$.

(Замечание. Появление в правой части уравнения (15) симплекса c_{2f}/c_{2w} представляет собой соответствующую форму учёта в интегральном уравнении диффузии произведения $(V_y)_w(c_{1f} - c_{1w})$. Большие значения комплекса Dk/Le_f^n в экспериментах, о которых выше шла речь, отвечали испарению легколетучих жидкостей. При этом концентрация $\tilde{c}_{1w}$ (испарение ацетона) достигала значения 0,5 (при $\tilde{c}_{1f} = 0$); соответственно отношение c_{2f}/c_{2w} равнялось двум. В тоже время, как уже отмечалось, значения $(V_y)_w$ по параметру b , учитывающему подтормаживающее действие поперечного потока вещества с поверхности, оставались сравнительно небольшими. При этом, очевидно, можно говорить также о большей относительной роли конвективного стефанова потока в процессе испарения. В более общем случае в теоретическом расчёте фактор c_{2f}/c_{2w} должен соответствующим образом учитываться (как и отклонение числа Шмидта от единицы).

При решении уравнения (15) в соответствии с изложенным методом получаем много член, в который β входит, в том числе, в отрицательных степенях. Значения β , отвечающие формулам (12), подставлялись в этот многочлен в качестве нулевого приближения. Дальнейшее решение получаемого уравнения показывает существование зависимости $\beta = \beta(x)$.

Так, принимая $\zeta = 1/2$ и полагая соответственно $\beta = 6,3/5 = 1,26$, имеем $d\beta/dx = -0,30/x$; $\frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,24}{x}$. Для $\zeta = 1/5$ и, полагая $\beta \approx 3$, получаем $d\beta/dx \approx -1,31/x$; $\frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,44}{x}$. Для $\zeta = 1/10$ и, полагая $\beta \approx 6$, получаем $d\beta/dx \approx -3,12/x$; $\frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,52}{x}$. Для $\zeta = 1/20$ и, полагая $\beta \approx 12$, получаем $d\beta/dx \approx -6,76/x$; $\frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,56}{x}$.

Представляется очевидным, что вследствие испарения концентрация c_1 внутри слоя должна по потоку расти; тогда соответственно при значениях $0 < y < \delta_c$ производная $\partial c_1 / \partial x > 0$, а $\partial \tilde{c}_1 / \partial x < 0$.

Рассмотрим выражение (14). Поскольку δ представляет собой толщину динамического пограничного слоя (равную толщине диффузионного в “стандартных” условиях и при $Sc = 1$), то $\left(\frac{d\delta}{dx}\right) = \frac{1}{2x}$ и величина $\frac{d\beta}{\beta dx}$, оставаясь отрицательной, не должна по модулю превысить $0,5x^{-1}$. Тогда и полученные выше при $\zeta < 1/5$ значения $\frac{d\beta}{\beta dx}$ должны быть скорректированы.

В этой связи вновь обратим внимание на выражение (10).

Положим в качестве нулевого приближения, что представление производной $\partial \tilde{c}_1 / \partial x$ по (10) применимо для всех $\zeta \leq 1$, и сопоставим его “напрямую” с выражением этой производной по (14). Полагая в этих выражениях одними и теми же соответствующие величины производных и координат, получим, что $\frac{d\delta_c}{\delta_c} = \frac{\zeta}{2} \frac{dx}{x}$, и, интегрируя последнее, $\delta_c \sim Cx^{\zeta/2}$, где C зависит от ζ .

Если $\zeta=1$, то $\delta = C_{\zeta=1} \cdot x^{1/2}$; таким образом, $C_{\zeta=1}$ равняется примерно $5\sqrt{\nu/U}$, а наиболее естественным для толщины диффузионного пограничного слоя тогда представляется выражение

$$\delta_c \approx f(\zeta) \frac{5x}{\sqrt{Ux/\nu}} \left(\frac{x}{l_0} \right)^{\frac{\zeta-1}{2}} = f(\zeta) \frac{5x^{1/2}}{\sqrt{U/\nu}} \left(\frac{x}{l_0} \right)^{\frac{\zeta-1}{2}}, \quad (19)$$

где $f(\zeta) \equiv \zeta^{-1/3}$, если $1 \geq \zeta \geq 1/2$, и $f(\zeta) \equiv 0,63\zeta^{-1}$, если $\zeta \leq 1/2$;

l_0 – характерный размер; $0 < x \leq l_0$.

Соответствующая формула для β с учётом зависимости от продольной координаты выглядит как

$$\beta \equiv f(\zeta) \left(x/l_0 \right)^{\frac{\zeta-1}{2}}. \quad (20)$$

Соотношения (19), (20) требуют некоторого обсуждения.

Существует определённая проблема (в том числе теоретическая), связанная с необходимостью перехода от рассмотрения пластины (плоской поверхности) с конечной длиной (что соответствует фактическому положению дел) к упрощённой постановке задачи для полубесконечной плоскости. Не вдаваясь в подробности, отметим, что этот переход связан с определёнными условиями [16].

В случае $\zeta < 1$ формулы (19), (20) предполагают как бы обратный переход к поверхности с конечным продольным размером l_0 ; очевидно, что этот размер должен быть достаточно большим. (Можно предположить, что для малых ζ размер l_0 может приниматься как предельный, соответствующий переходу к турбулентному пограничному слою.)

В случае $\zeta \rightarrow 1$ ситуация (независимо от конкретного значения l_0) приближается к “стандартному” случаю, отвечающему классической задаче с полубесконечной плоскостью.

На основе (20) представим:

$$\frac{d\beta}{\beta dx} = \frac{\zeta-1}{2x}, \quad (21)$$

$$\text{что при } \zeta=1/2 \text{ даёт } \frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,25}{x}; \text{ при } \zeta=1/5 \quad \frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,40}{x};$$

$$\text{при } \zeta=1/10 \quad \frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,45}{x}; \quad \text{при } \zeta=1/20 \quad \frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,475}{x}.$$

Эти результаты можно рассматривать как достаточно близкие к тем, что получены с помощью интегрального уравнения диффузии (15), но при этом выражение (21) чётко показывает: при $\zeta \rightarrow 0$ значение $\frac{d\beta}{\beta dx} \rightarrow -\frac{1}{2x}$.

В то же время необходимо заметить, что получаемые на основе классической теории и с её участием решения неприменимы в области, непосредственно примыкающей к входной кромке, т.е. в области достаточно малых значений продольной координаты.

Также в целом более сложен характер зависимости β от продольной координаты.

Например, для значений $\zeta=1/2$, $x/l_0=0,01$ параметр β по формуле (20) равняется четырём. При этом значение комплексного параметра $\zeta\beta$ равняется двум, и это приемлемо для приближённого представления относительной концентрации по выражению (17), но указанные величины ζ и β не отвечают решению на основе интегрального уравнения диффузии.

Удовлетворительное согласование при $\zeta=1/2$ имеет место для $x/l_0 \geq 0,1$. При $x/l_0=0,1$ согласно (20) $\beta=2,2$, и через решение интегрального уравнения диффузии получаем: $d\beta/dx \equiv -1/x$, $\frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,45}{x}$, т.е. сама величина изменения β , как и следовало ожидать, связана также со значением продольной координаты.

Ещё один использовавшийся нами способ приближённого интегрирования уравнения диффузии (8) основан на методологиях Швеца и Тарга [6], разрабатывавшихся применительно к скоростному пограничному слою конечной величины.

Принимаем для уравнения диффузии (8) в качестве нулевого приближения, что $\partial^2 \tilde{c}_1 / \partial y^2 = 0$. Соответственно, используя условие (4), далее принято ($Sc=1$):

$$\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} = \frac{\zeta \beta \cdot 1,5}{\delta_c} = \frac{1,5 \zeta}{\delta} = \text{const.}$$

При дальнейшем интегрировании в уравнение диффузии подставлялись:

$\partial \tilde{c}_1 / \partial y$ согласно последнему выражению; $\partial \tilde{c}_1 / \partial x$ согласно (14); $\tilde{V}_x = 1,5 \tilde{y} - 0,5 \tilde{y}^3$, если $\delta_c \leq \delta$, и $\tilde{V}_x = 1$, если $\delta_c \geq \delta$. Согласно уравнению

непрерывности $V_y = (V_y)_w - \int_0^y \frac{\partial V_x}{\partial x} dy$, при этом значением $(V_y)_w$ в наших вычислениях ввиду его относительной малости снова пренебрегали.

После того, как было получено выражение для производной $\partial \tilde{c}_1 / \partial y$ в следующем приближении, интегрирование продолжали до получения выражения для относительной концентрации $\tilde{c}_1$. Далее использовалось граничное условие: $\tilde{c}_1 = 1$ при $y = \delta_c$.

В результате получается многочлен, содержащий параметры ζ и β ; при этом показатель степени параметра β достигал положительной шестой степени. Подстановка в это выражение значений $\zeta = 1$, $\beta = 1$ не даёт полного согласования левой и правой частей получаемого уравнения: при правой части, равной единице, т.е. значению $\tilde{c}_1$ при $y = \delta_c$, левая часть приближённо равна 0,9.

Однако при $\zeta = 1/2$ и, принимая для β , как и раньше, нулевое приближение, равное 1,26, имеем хорошее соответствие с данными, получаемыми по выражению (21) и через решение интегрального уравнения диффузии: $d\beta/dx = -0,29/x$, $\frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,23}{x}$. То же при

$\zeta = 1/5$, где принималось нулевое приближение $\beta \approx 3$: $d\beta/dx = -1,14/x$, $\frac{d\beta}{\beta dx} = -\frac{0,38}{x}$.

При ещё меньших значениях ζ метод требует коррекции; возникающие здесь неточности в первую очередь, как представляется, связаны с появлением в результирующем приближающем многочлене больших чисел (из-за наличия высоких степеней β).

Заключение и некоторые замечания, касающиеся испарения в турбулентный пограничный слой при числах $Dk/Le_f^n > 1$

Рассматриваемые в данной работе результаты связаны с фактическим поведением диффузионного пограничного слоя при числах $Dk/Le_f^n > 1$.

В то же время отметим, что если для ламинарного обтекания использовать отношение $\delta_{c,усл}/\delta_{0,усл}$, где $\delta_{c,усл}$ представляет собой толщину диффузионного условного пограничного слоя при значениях $\zeta < 1$, а $\delta_{0,усл}$ - такую же толщину при $\zeta = 1$, то вместо формул (12) получим: $\delta_{c,усл}/\delta_{0,усл} = \zeta^{-1}$.

Но то же самое следует из соотношения (1), которое, как отмечалось, непосредственно было получено с использованием экспериментальных данных по испарению в турбулентный пограничный слой.

Действительно,

$$Nu_{mC_{2w}} = \frac{(Dp)_w}{(Dp)_f} \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} \right)_w \cdot l = \frac{(Dp)_w}{(Dp)_f} \frac{1}{\delta_{c,усл}},$$

соответственно

$$(Nu_{mC_{2w}})_0 = \frac{(Dp)_{w,0}}{(Dp)_f} \left(\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} \right)_{w,0} \cdot l = \frac{(Dp)_{w,0}}{(Dp)_f} \frac{1}{\delta_{0,усл}},$$

где $\delta_{с,усл}$, $\delta_{0,усл}$ также должны означать толщины диффузионного условного пограничного слоя, т.е. толщины, отвечающие чисто линейному изменению профиля концентраций, начинающемуся непосредственно от обтекаемой поверхности испарения.

Очевидно, что рассматриваемая в настоящей работе модель диффузионного пограничного слоя при ламинарном обтекании поверхности испарения и полученные ранее на полуэмпирической основе критериальные зависимости для турбулентных течений свидетельствуют об определённом единстве в характере влияния безразмерного комплекса Dk/Le_f^n на массоотдачу при испарении и в характере формирования соответствующих пограничных слоёв.

Комплексный параметр Dk/Le_f^n в экспериментах с испарительным охлаждением принимал значения, большие единицы, за счёт того, что температура поверхности испарения была выше той, что отвечает "стандартному" случаю (в свою очередь, это связано с уже упоминавшимся выше сопряжённым по фазам характером задачи).

При этом примерно по экспоненте возрастает парциальное давление пара и его концентрация на поверхности раздела фаз. В тоже время, если локальная интенсивность молекулярно-диффузионного переноса, характеризующуюся коэффициентом проводимости, заметно не меняется, то соответственно требуются большие расстояния для выравнивания концентраций пара до их значений в основном потоке, нежели в «стандартном» случае.

Литература

1. Шпаковский Р.П., Пастухова Г.В. Массотеплоотдача при испарении в газовый поток // Теоретические основы химических технологий. 1998. Т.32, №3. С. 256-263.
2. Шпаковский Р.П. Задача Стефана и тепломассоперенос при испарении // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2012. №9-10. С. 57-67.
3. Шпаковский Р.П. Тепломассоперенос при испарении в газовый поток: монография // Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2013. 256 с.
4. Шпаковский Р.П. Аппроксимация профиля концентрации в газовой фазе при испарении // Теор. основы хим. технол. 2002. Т.36, №2. С. 135-140.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. 742 с.
6. Гинзбург И.П. Теория сопротивления и теплопередачи. Л.: Изд-во Ленинградского университета. 1970. 376 с.
7. Шишкова И.Н., Крюков А.П. Приближённое решение сопряжённой задачи тепло- и массопереноса через межфазную поверхность // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 2. С. 483-488.
8. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и аэромеханика. 2016. №1. С. 17–22.
9. Яманаев Г.А. Особенности выбора методики для расчёта испарения // Центральный научный вестник. 2018. Т.3. № 2. С. 47-48.
10. Елизаров Д.В., Елизаров В.В., Камалиев Т.С., и др. Математическое моделирование массопереноса при ламинарном движении капли в жидкой среде // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 2. С. 298-309.
11. Gu L.D., Min J.C., Tang Y.C. Effects of mass transfer on heat and mass transfer characteristics between water surface and airstream // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 122. pp.1093-1102.
12. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Effect of evaporating droplets on flow structure and heat transfer in axisymmetrical separated turbulent flow // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 140. pp. 767-776.
13. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Модель тепло- и массоотдачи в шероховатых и орошаемых каналах // Теплофизика и аэромеханика. 2015. № 4. С. 453-458.
14. Высокоморная О.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А. Условия интенсивного испарения неоднородной капли воды в высокотемпературной газовой среде // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2015. № 5-6. С. 53-59.
15. Feng Chen, Chandra Sanjeev. Evaporation of ethanol films wicking on structured porous coatings deposited on copper plates // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 136. pp. 821-831.
16. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М.: Высш. школа, 1974. 328 с.
17. Hartnett J.P., Eckert E.R.G. Mass-Transfer Cooling in a Laminar Boundary Layer with Constant Fluid Properties // Recent Advances in Heat and Mass Transfer, New York-Toronto-London, 1961. pp. 142-160.

18. Шпаковский Р.П., Якунин Ю.И. К решению уравнения диффузии пограничного слоя при нелинейном краевом условии Стефана // Матем. методы в технике и технол. ММТТ-17, Кострома, 2004. Т.1.С. 151-154.

Автор публикации

Шпаковский Ростислав Павлович – канд. техн. наук, доцент, кафедра Технология и оборудование химических и пищевых производств Дзержинского политехнического института НГТУ.

References

1. Shpakovskii RP, Pastukhova GV. Mass-heat transfer when evaporation into the gas stream. *Teor. Osnovy khimicheskikh tekhnologii*. 1998;32(3):256-263.
2. Shpakovskii R. P. Stefan Problem and the heat-mass transfer by evaporation. *Izvestiyavuzov. Energy problem*. 2012;9-10:57-67.
3. Shpakovskii RP. Heat- mass transfer by evaporation into the gas stream: monograph. N. Novgorod: N. Novgorod State Technical University of R.E. Alekseev's name. 2013. 256 p.
4. Shpakovskii R. P. Approximation of the concentration profile in the gas phase during evaporation *Teor. osnovykhim.technol*. 2002;36(2):135-140.
5. Schlichting H. Grenzschicht-Theorie. Karlsruhe: Verlag G. Braun, 1965.
6. Ginzburg, IP. Theory of resistance and heat transfer. Leningrad: Publishing house leningr. university press, 1970. 376 p.
7. Shishkova IN, Kryukov AP. Approximate solution of the conjugate problem of heat and mass transfer through the interface. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2016;89(2):483-488.
8. Kuznetsov GV, Feoktistov DV, Orlova EG. Evaporation of liquid droplets from the surface of anodized aluminum. *Thermophysics and aeromechanics*. 2016;1:17-22.
9. Yamanaev GA. Features of the choice of methodology for calculating evaporation. *Central Scientific Bulletin*. 2018;3(2):47-48.
10. Elizarov DV, Elizarov VV, Kamaliev TS, et al. Mathematical modeling of mass transfer in the laminar motion of a drop in a liquid medium. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2016;89(2):298-309.
11. Gu LD, Min JC, Tang YC. Effects of mass transfer on heat and mass transfer characteristics between water surface and airstream. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2018;122:1093-1102.
12. Pakhomov MA, Terekhov VI. Effect of evaporating droplets on flow structure and heat transfer in axisymmetrical separated turbulent flow // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2019;140:767-776.
13. Laptev AG, Lapteva EA. Model of heat and mass transfer in rough and irrigated canal. *Thermophysics and aeromechanics*. 2015;4:453-458.
14. Vysokomornaya OV, Piskunov MV, Strizhak PA. Conditions for intensive evaporation of a non-uniform water droplet in a high-temperature gas environment. *Izvestiya VUZov. Energy problems*. 2015;5-6:53-59.
15. Feng Chen, Chandra Sanjeev. Evaporation of ethanol films wicking on structured porous coatings deposited on copper plates. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2019;136:821-831.
16. Gukhman AA. Application of similarity theory to the research of heat - mass transfer processes. – M.: VysshayaShkola, 1974. 328 p.
17. Hartnett JP, Eckert ER. G. *Mass-Transfer Cooling in a Laminar Boundary Layer with Constant Fluid Properties*. Recent Advances in Heat and Mass Transfer, New York-Toronto-London, 1961. P. 142-160.
18. Shpakovskii RP, Yakunin YI. To the solution of the diffusion equation boundary layer with nonlinear boundary condition of Stefan. *Mat. methods in engineering and technol. MMTT-17*. Kostroma, 2004;1:151-154.

Author of the publication

Rostislav P. Shpakovskii – Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseev. Dzerzhinsk Polytechnic Institute, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region. Email: rst-shp@list.ru

Поступила в редакцию

20 октября 2020г.



ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДКИ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Нгуен Зуи Хынг, В.Ф. Новиков

Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8178-3873>, hungnguyenat73@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Трансформаторное масло широко применяется в высоковольтном электрооборудовании и выполняет функции диэлектрика, а также является охлаждающей средой. Оно состоит из сложной смеси углеводородных композиций с различными примесными соединениями. В процессе эксплуатации маслonaполненного электрооборудования под воздействием технологических условий эксплуатации высоковольтных аппаратов, происходит старение как трансформаторного масла, так и твердой изоляции. В этом случае диэлектрические свойства ухудшаются, что может вывести трансформаторное оборудование из строя. *МЕТОДЫ.* Для увеличения срока эксплуатации маслonaполненного электрооборудования в трансформаторное масло на стадии его изготовления вводится антиокислительная присадка, в качестве которой наиболее часто применяют ионол, концентрацию которого необходимо контролировать постоянно различными инструментальными методами. Для определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле используют систему пробоподготовки, основанную на жидкофазной экстракции селективными растворителями в качестве которых применяют алифатические спирты различной физико-химической природы. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Установлено, что этиловый спирт, который широко применяется в системе пробоподготовки для жидкостной экстракции ионола, содержит значительное количество воды, оказывающей негативное влияние на процесс извлечения ионола из трансформаторного масла. Кроме того в состав этилового спирта входят примесные вещества, которые могут также оказывать негативное влияние на процесс жидкофазной экстракции ионола из трансформаторного масла. Приведены обобщенные данные по физико-химическим свойствам экстрагентов, используемых для извлечения ионола из трансформаторного масла. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Показано, что для экстракции ионола наиболее перспективным органическим растворителем является бутанол, который имеет более высокую температуру кипения по сравнению с этиловым спиртом и содержит небольшое количество воды. Установлено, что селективность хроматографического разделения компонентов бутанола с повышенной температуры колонки падает. В то же время эффективность разделения повышается, так как увеличивается число теоретических тарелок на метр хроматографической колонки. С повышением температуры капиллярной колонки увеличивается также симметрия хроматографических пиков разделяемых компонентов.

Ключевые слова: Ионол, диэлектрик, электрооборудование, трансформаторное масло, хроматография, антиокислительная присадка, методика.

Для цитирования: Нгуен Зуи Хынг, Новиков В.Ф. Проблема определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле хроматографическими методами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2020. Т.22. № 5. С.107-115. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-107-115.

THE PROBLEM OF DETERMINING THE ANTIOXIDANT ADDITIVE IN TRANSFORMER OIL BY CHROMATOGRAPHIC METHODS

Nguyen Duy Hung, Novikov VF.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8178-3873>, hungnguyenat73@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* Transformer oil is widely used in high-voltage electrical equipment and acts as a dielectric and also as a cooling medium. It consists of a complex mixture of hydrocarbon compositions with various impurity compounds. During the operation of oil-filled electrical equipment under the influence of the technological operating conditions of high-voltage devices, aging of both transformer oil and solid insulation occurs. In this case, the dielectric properties deteriorate, which can damage the transformer equipment. *METHODS.* To increase the service life of oil-filled electrical equipment, an antioxidant additive is introduced into the transformer oil at the stage of its manufacture, which is most often used as ionol, the concentration of which must be constantly controlled by various instrumental methods. To determine the antioxidant additive in transformer oil, a sample preparation system is used based on liquid-phase extraction with selective solvents, which are used as aliphatic alcohols of various physical and chemical nature. *RESULTS.* It has been established that ethyl alcohol, which is widely used in the sample preparation system for liquid extraction of ionol, contains a significant amount of water, which has a negative effect on the process of ionol extraction from transformer oil. In addition, the composition of ethyl alcohol contains impurity substances that can have a negative effect on the process of liquid-phase extraction of ionol from transformer oil. The generalized data on the physicochemical properties of extractants used to extract ionol from transformer oil are presented. *CONCLUSION.* It has been shown that butanol is the most promising organic solvent for the extraction of ionol, which has a higher boiling point compared to ethyl alcohol and contains a small amount of water. It was found that the selectivity of the chromatographic separation of butanol components with an elevated column temperature increases. At the same time, the separation efficiency increases as the number of theoretical plates per meter of chromatographic column increases. As the temperature of the capillary column increases, the symmetry of the chromatographic peaks of the separated components also increases.

Key words: Ionol, dielectric, electrical equipment, transformer oil, chromatography, antioxidant additive, technique.

For citation: Nguyen Duy Hung, Novikov VF. The problem of determining the antioxidant additive in transformer oil by chromatographic methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):107-115. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-107-115.

Введение и литературный обзор

К одной из наиболее важных задач энергетической отрасли промышленности относится бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией. Поэтому для поддержания трансформаторного электрооборудования в работоспособном состоянии следует постоянно проводить его диагностику с целью выявления технических дефектов, возникающих в процессе эксплуатации.

К одним из основных дефектов трансформаторного электрооборудования относится старение материалов, некачественное изготовления деталей, недостатки в эксплуатации, оборудования, отключение электрической сети и перебои в электроснабжении, посторонние воздействия, недостаточно качественные ремонтные работы, внешнее влияние и другие объективные причины [1-3].

Продолжительность работы трансформаторного электрооборудования существенно зависит от качества заливаемого в него трансформаторного масла, которое в процессе эксплуатации под воздействием различных факторов частично теряет свои эксплуатационные характеристики и по этой причине постоянно стареет. В результате деструкции бумажной изоляции образуются фурановые соединения, которые мигрируют в трансформаторное масло и ухудшают его физико-химические и электроизоляционные свойства [4-5].

Для продления срока эксплуатации трансформаторного масла в него добавляют антиокислительную присадку, которая затрудняет процесс термоокислительного старения. Это процесс протекает по радикально цепному механизму с образованием свободных радикалов. Наиболее распространенной антиокислительной присадкой, добавляемой в отечественные трансформаторные масла является (2, 6 - ди - трет - бутил - пара - крезол), торговое название которого «Ионол».

Антиокислительная присадка находится в трансформаторном масле в растворенном состоянии и при его регенерации не извлекается адсорбентами. В процессе эксплуатации трансформаторного масла антиокислительная присадка постоянно вырабатывается,

скорость расходования которой зависит от многих трудно контролируемых факторов. В соответствии с методическими указаниями по эксплуатации трансформаторного масла (РД 34.43.105.89, Союзтехэнерго, 1989). Как при снижении концентрации антиокислительной присадки так и при её высоком содержании, превышающем нормальный показатель, начинается процесс интенсивного старения трансформаторного масла с образованием шлама, повышается расход силикагеля в фильтрах, что приводит к преждевременной замене отработанного масла свежим. Поэтому в процессе эксплуатации трансформаторного электрооборудования необходимо постоянно контролировать содержание антиокислительной присадки в трансформаторном масле. С этой целью используют различные инструментальные методы анализа [6-8].

Наиболее простыми доступными методами контроля содержания антиокислительной присадки в трансформаторном масле являются спектральные, которые характеризуются достаточно хорошей экспрессностью. На промышленных предприятиях контроль за содержанием ионола в трансформаторных маслах проводится хроматографическими методами. Идентификацию хроматографического пика ионола в сложной смеси индивидуальные компоненты трансформаторного масла осуществляют с использованием различных приемов. В последнее время более широко для определения ионола стали применять высокоэффективную жидкостную, или тонкослойную хроматографию [9-11]. При этом для анализа как правило используются новые сорбционные материалы [12-16].

Материалы и методы

Антиокислительная присадка «Ионол» вводимая в трансформаторное масло на стадии его изготовления, относится к липофильным органическим веществам класса фенолов. Эта присадка существует в твердом агрегатном состоянии в виде технического порошка желтого цвета, в чистом виде белого цвета. Ионол хорошо растворяется в ароматических углеводородах, кетонах и сложных эфирах. В воде и щелочах практически не растворяется. Характеризуется высокой температурой плавления от 69 до 73⁰С и кипения 261⁰С, что затрудняет его хроматографический анализ в трансформаторном масле, так как требует высокой температуры хроматографической колонки. Ионол является донором атома водорода, подавляет автокаталитические процессы радикального окисления, что позволяет его применять в качестве антиокислительной присадки также и для использования в продуктах питания в качестве пищевой добавки Е-321.

Для определения концентрации ионола в трансформаторном масле и оценки влияния органических растворителей на процесс хроматографического разделения, экспериментальную часть работы проводили на газо-жидкостном хроматографе марки «ХромосГХ-1000», с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной хроматографической колонкой, длиной 30м., с внутренним диаметром 0,32мм., заполненную полярной неподвижной фазой *Vako BoHa VB WAX P/n CF 5903032050A*. с толщиной пленки 0,5мкм.

Хроматографический анализ проводили как в изотермическом режиме так и с линейным программированием температуры хроматографической колонки от 40⁰С до 250⁰С со скоростью подъема температуры пять градусов в минуту.

Условия проведения эксперимента: Газо-хроматографический комплекс «ХромосГХ-1000», с пламенно-ионизационным детектором. Температура испарителя составляла 200⁰С, температура детектора 250⁰С. В качестве газа носителя использовали аргон высшего сорта в соответствии с ГОСТ 10157-79, с объемной долей – основного вещества 99,9980%. Для питания пламенно-ионизационного детектора использовали водород технический марки А в соответствии с ГОСТ 3022-80, с объемной долей основного вещества 99,9900% а также воздух технические класса загрязненности 1, по ГОСТ 17433-80. Скорость газа носителя аргона на выходе из капиллярной колонки составляла 0,048 - 0,066 дм³/ч, сброс газа носителя 1:50, скорость водород 25см³/мин, скорость воздуха 250см³/мин. Предел детектирования пламенно-ионизационного детектора составлял 1.3.10⁻¹² чс/с.

Пробоподготовку трансформаторного масла проводим с использованием жидкостной экстракцией селективными растворителями, в качестве применяли алифатические спирты: метанол, этанол, пропанол-2, пропанол-1, бутанол-2, изо-аминол. Процесс извлечения ионола из трансформаторного масла осуществляли под тягой в герметичном экстракторе, куда помещали 2 см³ трансформаторного масла и 2 см³ экстрагента и оставляем в темном месте на 5-10 часов. Затем экстракт помещали в карусели автоматический дозатор хроматографа и дальнейший процесс разделения проводился без участия оператора в автоматическом режиме.

Анализируемые вещества дозировали с помощью узла ввода пробы с использованием дозатора автоматического жидкостного ДАЖ-23, в карусели которого установлены 23 виалы с объемом каждой 2мл. Объем вводимой пробы в испаритель хроматографа во всех случаях составлял 1,0мкл. Скорость набора пробы в виалы составляла 20мкл/сек, скорость дозирования 30 мкл/сек, время накопления пробы в испарителе хроматографа в процессе дозирования составляло 10сек. Дозатор работает в автоматическом режиме, имеет канал связи по сети *Ethernet*. Настройка дозатора заключается в загрузке параметров и их сохранение, юстировке, смене виалы, ожидания, готовности прибора, промывке перед дозированием, промывка пробой, промывка после дозирования, устранение пузырьков, взятия пробы из виалы, взятия пробы внутреннего стандарта, дозирование в испаритель хроматографа. Все процедуры процесса протекает в замкнутой герметичной системе без потери экстрагента и попадания его окружающую воздушную среду.

Для сбора и обработки хроматографической информации, управлением хроматографа, ведение базы данных по всем анализам, имеется программное обеспечение «ХромосГХ-1000», отличительной чертой которого является простота и удобство эксплуатации, а также минимизация действия оператора для получения запланированных результатов. В программное обеспечение «ХромосГХ-1000», введена функция оперативной оценки уровня флуктуационных шумов и дрейфа нулевой линии на любом участке хроматограммы.

Обсуждение результатов

Газо-хроматографическое определение антиокислительной присадки «Ионола» непосредственно прямым методом представляет определенные трудности, заключающиеся в сложном углеводородном составе трансформаторного масла.

На рис. 1 приведена хроматограмма разделения трансформаторного масла на индивидуальные компоненты, из которой видно, что их количество составляет 250 соединений, кипящих в широком температурном интервале. Из рис.1 также видно, что ионол может быть определен в трансформаторном масле непосредственно без проведения процедуры пробоподготовки, однако, общее время анализа является относительно высоким. Кроме того, после проведения эксперимента необходимо в течение нескольких часов проводить кондиционирование хроматографической колонки для очистки её от высококипящих компонентов трансформаторного масла.

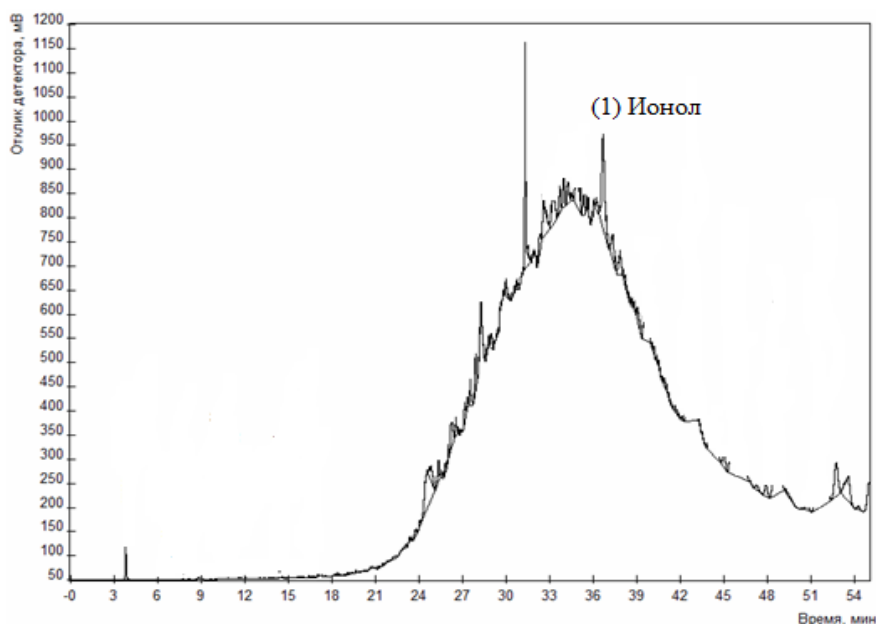


Рис. 1. Хроматограмма разделения индивидуальных компонентов трансформаторного масла. Условие анализа: Хроматограф марки «Хромос ГХ-1000» с пламенно-ионизационным детектором, колонка капиллярная кварцевая длиной 30м., с внутренним диаметром 0,32мм, заполненная *Vako BoHa VB WAX P/n CF 5903032050A*. Скорость газа носителя 0,05мл/мин. Линейное программирование температуры колонки от 40⁰С до 250⁰С со скоростью подъема температура пять градусов в минуту

Наиболее распространенным способом определения ионола в трансформаторном масле является экстракция его органическими растворителями с последующим анализом получаемого экстракта газо-хроматографическим методом с использованием насадочных

или капиллярных колонок. Наиболее часто экстрагирование ионола из трансформаторного масла осуществляют этанолом в соотношении спирт масло 1:1. Получаемый экстракт отстаивают в течение 5 часов, или центрифугируют в течении 5 минут при 3000 оборотов в минуту и затем вводят пробу этанольного экстракта в испаритель хроматографа. Анализ проводят с использованием линейного программирования температуры.

В этом случае время проведения хроматографического анализа составляет около 65 минут, а присутствующая в этаноле вода ухудшает проведения процесса экстракции, что приводит к повышению погрешности определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле [10].

В качестве экстрагентов ионола из трансформаторного масла можно применять и другие алифатические спирты так как их физико-химические свойства имеют близкие значения (табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические и хроматографические свойства алифатических спиртов. $T_{кип}, ^\circ C$ – температура кипения; H_2O масс.%. содержание воды; $t_{уд.}$ – время удерживания алифатических спиртов при температуре $40^\circ C$; N_M – эффективность на метр капиллярной хроматографической колонки; K_A – коэффициент асимметрии хроматографического пика).

№ п/п	Спирт	Формула	$T_{кип},$ $^\circ C$	$T_{колонки} = 40^\circ C$			$H_2O. \%_{м}$ асс	ГОСТ
				$t_{уд.}$	$N_{M, T.T}$	K_A		
1	Метанол	CH_3OH	64,7	5,210	337	2,4	0,08	2222-95
2	Этанол	C_2H_5OH	74,4	6,166	406	0,2	4,00	56389-2015
3	изо-Пропанол	C_3H_7OH	97,0	5,781	1124	0,7	1,01	242130
4	изо-Бутанол	C_4H_9OH	108,0	16,625	3280	1,2	0,20	9536-2013
5	н-Бутанол	$C_4H_{10}O$	117,4	24,547	5518	0,9	0,05	6006-78
6	изо-Аминол	$C_5H_{11}OH$	131,0	39,811	4876	0,8	0,10	5830-79

Как видно из табл.1. все алифатические спирты характеризуются различным содержанием воды. Наиболее высокое содержание воды характерно для этанола (4,00%), который кроме того является более гигроскопичным и может сорбировать влагу также из атмосферы. Наиболее низкие концентрации влаги наблюдаются для н-бутанола (0,05%). Кроме того при хроматографическом анализе алифатических спиртов на капиллярной колонке пик н-бутанола является более симметричным (Коэффициент асимметрии $K_A = 0,9$) и характеризуется большей эффективностью разделения, равной 5518 теоретических тарелок на метр хроматографической колонки. Это позволяет определять его концентрацию с меньшей погрешностью. В этой связи для экстракции ионола из трансформаторного масла более перспективным является использования н-бутанола вместо этанола.

На рис. 2 Приведена хроматограмма разделения смеси алифатических спиртов и ионола в условиях программирования температуры хроматографической колонки. Из рис. видно, что наблюдается достаточно хорошая селективность хроматографического разделения всех алифатических спиртов от антиокислительной присадки, «Ионола». При этом время удерживания ионола не превышает 38 мин.

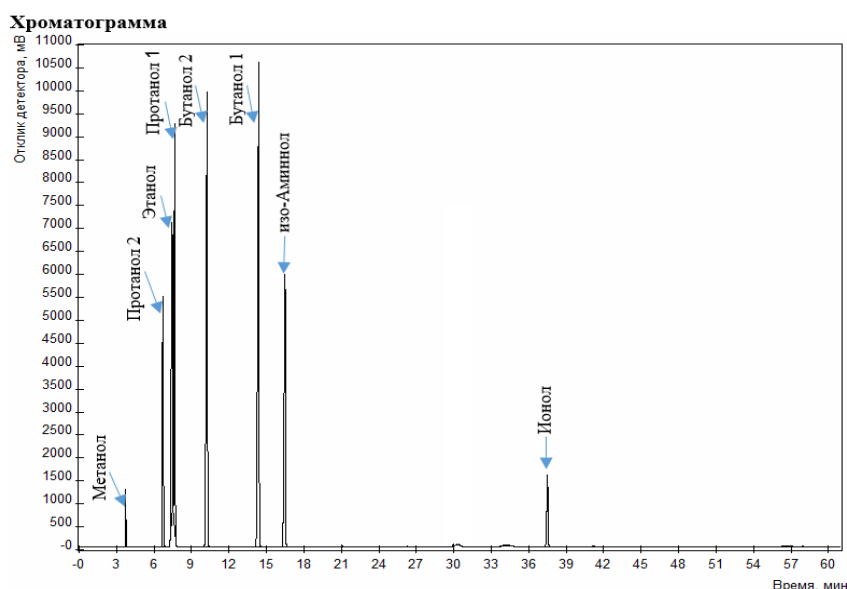


Рис. 2. Хроматограмма разделения смеси алифатических спиртов и антиокислительной присадки «Инол» Условия анализа:Хроматограф марки «Хромос ГХ-1000»,с пламенно-ионизационном детектором, колонка капиллярная кварцевая дилиной 30м., с внутренним диаметром 0,32мм, заполненная *Vako BoHa VB WAX P/n CF 5903032050A*.Скорость газа носителя0,05мл/мин. Линейное программирование температуры колонки от 50⁰С до 180⁰С со скоростью подъема температуры пять градусов в минуту

Таблица 2

Зависимость абсолютного времени удерживания алифатических спиртов и инола от температуры хроматографической колонки. Условия анализа: Хроматограф марки «Хромос ГХ-1000»,с пламенно-ионизационном детектором, колонка капиллярная кварцевая дилиной 30м, с внутренним диаметром 0,32мм, заполненная *Vako BoHa VB WAX P/n CF 5903032050A*. Скорость газа носителя0,05мл/мин. Температуры колонки от 40⁰С до 220⁰С.

№ п/п	Т _{Колонки} , °С	Абсолютное время удерживания спиртов и инола, мин.				
		Метанол	Этанол	н-Бутанол	изо-Аминол	Инол
1	40.00	5,210	6,166	24,547	39,811	-
2	60.00	3,467	3,910	12,080	15,670	-
3	80.00	2,754	2,900	6,680	7,943	-
4	100.00	2,454	2,457	3,890	4,740	110,513
5	120.00	2,344	2,430	2,951	3,311	41,687
6	140.00	2,265	2,380	2,692	2,951	19,952
7	160.00	2,290	2,390	2,600	2,730	11,180
8	180.00	2,344	2,430	2,570	2,670	7,070
9	200.00	2,400	2,530	2,570	2,710	5,140
10	220.00	2,530	2,580	2,650	2,723	4,220

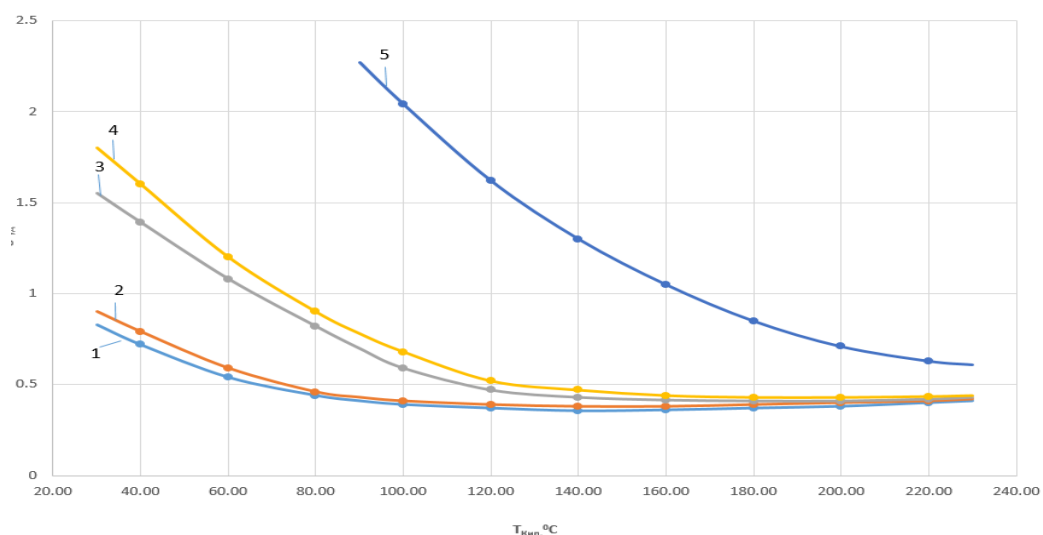


Рис. 3. Зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов и ионола от температуры хроматографической колонки:
1 – Метанол; 2 – Этанол; 3 – н-Бутанол; 4 – изо-Аминол;
5 – Ионол

На рис.3. приведена зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов и ионола от температуры разделения. Как видно из рис. с повышением температуры разделения логарифм времени удерживания алифатических спиртов и ионола существенно уменьшается, что связано с образованием межмолекулярной водородной связи гидроксильной группы спирта со структурными фрагментами полярной неподвижной фазы. Так как энергия межмолекулярной водородной связи с возрастанием температуры уменьшается то и время удерживания алифатических спиртов и ионола сокращается.

При температуре, превышающей 120⁰C все алифатические спирты не разделяются и время их удерживания практически не зависит от температуры. Это свидетельствует об изменении механизма хроматографического разделения, когда при повышенной температуре межмолекулярные водородные связи в системе сорбат-сорбент не образуются, а разделение на индивидуальные компоненты протекает по дисперсионному механизму, т. е. неподвижная фаза, в капиллярной колонке становится неполярной.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что в условиях капиллярной газ-жидкостной хроматографии представляется возможным определять антиокислительную присадку непосредственно прямым вводом трансформаторного масла в инжектор хроматографа. Для экстракции ионола из трансформаторного масла более перспективным является использование н-бутанола, который по сравнению с этанолом характеризуется меньшим содержанием воды.

Литература

1. Zukowski P., Koltunowicz T., Kierczynski K., et al. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. № 4. pp. 2156-2164.
2. Ризванова Г.И., Гафиятуллин Л.Г., Гарифуллин М.Ш., и др. Особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 9-10. С. 91-94.
3. Sarathi R., Yadav K.S., Swarna V. Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. № 5. pp. 2513-2521.
4. Козлов В.К., Сабитов А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. №9-10. С. 34-38.
5. Козлов В.К., Сабитов А.Х. Степени Низамутдинов Б.Р. Исследования процесс старения бумажно - масляной изоляции в видимом диапазоне // Известно вузов. Проблемы энергетики. Казань 2015. №3-4. С. 81-85.
6. Kurakina O.E., Kozlov B.K., Turanova O.A., et al. Research of the changes in the structural group composition of transformer oil during operation // problemeleenergeticiiregionale. 2018. № 2 (37). С. 39-45.

7. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Особенности оптических характеристик трансформаторных масел различных марок // Известия вузов. Проблемы энергетики. Казань. 2015. № 11-12. pp. 11-19.
8. Bo Qi, Xiaolin Zhao., Chengrong Li., et al. Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. № 4. Pp. 2148-2155.
9. Рудаков О.Б., Тхинь Фан Винь. Применение микроколоночной ВЭЖХ для контроля ионола в трансформаторном масле // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. Т.8. № 1. С.141-146.
10. Коробейников С.М., Лютикова М.Н. Исследование технологических операций, влияющих на определение концентрации присадки Ионол в изоляционном масле высоковольтного оборудования // Проблемы региональной энергетической. 2018. С. 96-105.
11. Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В. Инструментальные метода анализа. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике. Монография. Под ред. Проф. Новиков В.Ф. Казанский государственный энергетический университет. 2018. 328с.
12. Танеева А.В., Ильин В.К., Стойков И.М., и др. Фосфорилирования краун-эфиры в качестве сорбента для газо-жидкостной хроматографии органических соединений // Вестник технического университета. 2018. Т. 21. № 3. С. 17-20.
13. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическим методом с использованием новых сорбентов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 47-52.
14. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Тонкослойная хроматография как метод контроля фурановых соединений в трансформаторном масле // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 138-145.
15. Танеева А.В., Зиятдинова Р.В., Стойков И.И., и др. Влияние природы растворителей на сорбционные свойства тонкослойных пластинок «Sorbfil», модифицированных наночастицами тиакаликс [4] арен/SiO₂. Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т.18. № 6. С. 867-874.
16. Танеева А.В., Ву Нгок Зан., Нгуен Зуи Хынг., и др. Оценка межмолекулярных взаимодействий трифенильных производных элементов пятой группы. Периодической системы методом газо-жидкостной хроматографии. Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 5. С. 566-573.

Авторы публикации

Нгуен Зуи Хынг – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета.

Новиков Вячеслав Федорович – д-р хим. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Zukowski P, Koltunowicz T, Kierczynski K, et al. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015;22(4):2156-2164.
2. Rizvanova GI, Gafiyatullin LG, Garifullin M.Sh, et al. Osobennosti stareniya transformatornogo masla v real'nykh usloviyakh. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2015;9-10:91-94.
3. Sarathi R, Yadav KS, Swarna V. Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015;22(5):2513-2521.
4. Kozlov VK, Sabitov AKh. Stepen' polimerizatsii bumazhnoi izolyatsii silovykh transformatorov. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2018;20(9-10):34-38.
5. Kozlov VK, Sabitov Akh, Stepeni Nizamutdinov BR. Issledovaniya protsess stareniya bumazhno - maslyanoi izolyatsii v vidimom diapazone. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. Kazan'. 2015;3-4:81-85.
6. Kurakina OE, KozloVK, Turanova OA, et al. Research of the changes in the structural group composition of transformer oil during operation. *Problemele energeticii regionale*. 2018;2(37):39-45.
7. Kozlov VK, Garifullin MSh. Osobennosti opticheskikh kharakteristik transformatornykh masel razlichnykh marok. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. Kazan'. 2015;11-12:11-19.
8. Bo Qi, Xiaolin Zhao, Chengrong Li, et al. Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015;22(4):2148-2155.
9. Rudakov OB, Trinh Phan Vinh. Primenenie mikrokolonochnoi VEZHKh hdlya kontrolya ionola intransformatornom masle. *Sorbtsionnye & khromatograficheskie protsessy*. 2008;8(1):141-146.

10. Korobeinikov SM, Lyutikova MN. Issledovanie tekhnologicheskikh operatsii, vliyayushchikh na opredelenie kontsentratsii prisadki Ionol v izolyatsionnom masle vysokogo l'tnogo oborudovaniya. *Zhurnal «Problemy regional'noi energeticheskoi I»*. 2018. С. 96-105.

11. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva AV. Instrumental'nye metoda analiza. *V trekh chastyakh, z. III. Gazokhromatograficheskii kontrol' proizvodstvennykh protsessov in energetike*. Monografiya. Pod red. Prof. Novikov V.F. Kazan State Power Engineering University, Kazan. 2018. 328 P.

12. Taneeva AV, Il'in VK, Stoikov IM, et al. Fosforilirovaniya kraun - efiry in kachestve sorbenta dlya gazo - zhidkostnoi khromatografii organicheskikh soedinenii. *Vestnik tekhnicheskogo universiteta*. 2018;21(3):17-20.

13. Kartashova AA, Novikov VF. Opredelenie furanovykh soedinenii in transformatornom masle gazokhromatograficheskim metodom cispol'zovaniem novykh sorbentov. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2016;1-2:47-52.

14. Kartashova AA, Novikov VF. Tonkosloinaya khromatografiya kak metod kontrolya furanovykh soedinenii in transformatornom masle. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2016;1-2:138-145.

15. Taneeva AV, Ziatdinova RV, Stoikov II, et al. Vliyanie prirody rastvoritelei na sorbtsionnye svoistva tonkosloinykh plastinok «Sorbfil», modifitsirovannykh nanochastitsami tiakaliks[4]aren/SiO₂. *Sorbtsionnye & khromatograficheskie protsessy*. 2018;18(6):867-874.

16. Taneeva A.V., Vu Ngoc Dan., Nguyen Duy Hung., et al. Otsenka mezhmolekulyarnykh vzaimodeistvii trifetil'nykh proizvodnykh ehlementov pyatoi gruppy. *Periodicheskoi sistemy metodom gazo-zhidkostnoi khromatografii. Sorbtsionnye&khromatograficheskie protsessy*. 2019;19(5):566-573.

Authors of the publication

Nguyen Duy Hung – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: hungnguyenat73@gmail.com.

Novikov Vyacheslav Fedorovich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

04 октября 2020г.



ОПЕРАТИВНЫЙ РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТИ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В АИИС КУЭ

М.И. Данилов, И.Г. Романенко

Инженерный институт Северо-Кавказского федерального университета,
г. Ставрополь, Россия
mdanilov@ncfu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть трехфазную распределительную электрическую сеть (РЭС) напряжением 0,4 кВ, в которой ведется мониторинг (коммерческий учет) потерь электроэнергии автоматизированной информационно-измерительной системой контроля и учета электроэнергии (АИИС КУЭ). Решается задача оперативного расчета потерь электроэнергии имеющимися средствами АИИС КУЭ с целью выявления в РЭС несанкционированных отборов электроэнергии при условии неизвестных значений параметров схемы замещения сети, которые вследствие внешних климатических факторов могут существенно изменяться. МЕТОДЫ. При этом используются одновременные измерения для одного и того же интервала наблюдения действующих значений тока и напряжения, а также активной и реактивной мощностей в начале РЭС и у каждого зарегистрированного в ней абонента. РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведен анализ известных методов решения указанной задачи, показаны их недостатки и представлена новая методика, использующая равенство сопротивлений фазных и нулевого проводов в пределах межабонентского участка трехфазной РЭС. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предлагаемая методика основана на предварительном оперативном расчете достоверных значений сопротивлений межабонентских участков при указанных условиях и может применяться в существующих АИИС КУЭ без внесения в них дополнительных измерительных средств (функций).

Ключевые слова: распределительная сеть, параметры сети, потери электроэнергии, метод расчета, идентификация параметров.

Для цитирования: Данилов М.И., Романенко И.Г. Оперативный расчет потерь электроэнергии в сети с неизвестными параметрами в АИИС КУЭ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №5. С.116-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-116-127.

OPERATIVE CALCULATION OF ELECTRIC POWER LOSSES IN THE NETWORK WITH UNKNOWN PARAMETERS IN AIMS EMA

MI. Danilov, IG. Romanenko

Engineering Institute of North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
mdanilov@ncfu.ru

Abstract: THE PURPOSE. The process of on-line calculation of electricity losses in three-phase distribution electric networks (DEN) with a voltage of a 0,4 kV, where monitoring of electricity losses (commercial accounting) is carried out by an automated information-measuring system of electricity monitoring and accounting (AIMS EMA) is considered. The problem of operative detecting of unauthorized power take-offs in the DEN under condition of unknown values of parameters of the network equivalent circuit, i.e. resistances of its interperson sections, which can change significantly over time because of external climatic factors (temperature, humidity, etc.) is being solved. METHODS. The procedure of the proposed calculation can be implemented by the available means of AIMS EMA. It is based on simultaneous measurements for the same observation interval of effective values of current and

voltage, active and reactive powers at the beginning of the DEN and at each subscriber. In the course of periodic measurements of these mode parameters, the initial data used in the proposed calculation are formed. **RESULTS.** The analysis of the known methods of solving this problem is carried out, their disadvantages are shown and the new methodology, which is based on a preliminary operative calculation of reliable values of the resistances of interpersonal sections, provided that unauthorized power take-offs are possible in DEN is presented. While solving, the conditions of equality of resistances of the phase and neutral wires within the interpersonal section of the DEN are used. The proposed method makes available the implementation of the operative calculation of technical losses in DEN and the identification of the commercial losses (unauthorized power take-offs) in it, as well as a detailed analysis of subscriber data in order to detect the location (coordinate) and the amount of unaccounted electricity. **CONCLUSIONS.** The proposed methodology can be used in existing AIMS EMA without the introduction of additional measuring means (functions).

Keywords: distribution network, network parameters, loss of electric power, calculation method, parameter identification.

For citation: Danilov MI, Romanenko IG. Operative calculation of electric power losses in the network with unknown parameters in AIMS EMA. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):116-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-116-127.

Введение

Вопрос анализа энергетического баланса в распределительных электрических сетях (РЭС) и проблема контроля оплаты поставляемого ресурса (электроэнергии) привели к созданию и широкому внедрению в РЭС автоматизированных информационно-измерительных систем контроля и учета электроэнергии (АИИС КУЭ). В современных АИИС КУЭ реализованы технологии дистанционного взаимодействия зарегистрированных в сети счетчиков электроэнергии абонентов (СЭА) и головного счетчика электроэнергии (ГСЭ), установленного в начале контролируемого участка РЭС. Путем периодического сбора информации (показаний) с СЭА и сравнения ее с измерениями в ГСЭ осуществляется мониторинг потерь электроэнергии в распределительных сетях. Потери электроэнергии в сети являются естественным процессом, который обусловлен режимом функционирования РЭС и сопротивлениями участков ее линий. Однако, помимо указанных факторов, потери в РЭС могут быть обусловлены несанкционированными отборами электроэнергии (НОЭ), которые приводят к увеличению фиксируемых потерь на контролируемом участке сети. Оперативный мониторинг потерь электроэнергии в распределительных сетях и разработка методов выявления НОЭ являются актуальными проблемами, о чем свидетельствуют работы [1-4]. В представленных обзорах показано, что для решения указанной проблемы необходимо использовать интеллектуальные счетчики электроэнергии [5-7], входящие в систему *Smart-Grid*, отмечается важность применения различных методов моделирования. В работах [8, 9] представлены методы выявления НОЭ, в которых необходима информация о сопротивлениях межабонентских участков магистральной линии (МЛ). Важно отметить, что при этом используется условие равенства сопротивлений фазных и нулевого проводов в пределах одного межабонентского участка трехфазной РЭС и находится как координата (абонент), так и объем НОЭ. Сопротивления межабонентских участков считаются неизвестными вследствие того, что они в процессе работы РЭС могут в значительной степени изменяться в зависимости от внешних климатических факторов (температура, влажность и др.). Таким образом, встает вопрос о необходимости реализации в АИИС КУЭ функции их оперативного расчета [10] или измерения [11], что в таком случае требует значительного объема вычислительных операций. Также разработаны методы обнаружения НОЭ [12-15], в которых информация о сопротивлениях межабонентских участков МЛ считается неизвестной. При этом определяются абоненты с НОЭ, но не выполняется расчет его объема [14, 15]. Отметим, что сопротивления межабонентских участков МЛ являются параметрами схемы замещения РЭС [16], которые определяют ее технические потери и могут быть идентифицированы на основе векторов токов и напряжений на концах линии, получаемых от устройств *PMU (Phasor Measurement Unit)*, которые выполняют синхронные векторные измерения. Разработаны и менее затратные способы синхронных векторных измерений [17, 18]. Широкое внедрение достижений в

области синхронных векторных измерений [19] в АИИС КУЭ затруднительно вследствие экономической нецелесообразности (экономический результат не покрывает стоимость). Возможность идентификации указанных параметров средствами АИИС КУЭ является важным обстоятельством, поскольку это позволит проводить мониторинг потерь электроэнергии и осуществлять оперативную диагностику функционального состояния распределительной сети [20, 21] с целью контроля ее уровня надежности в режиме реального времени. Таким образом, вопрос определения значений сопротивлений межабонентских участков МЛ, а, следовательно, векторов тока и напряжения в распределительной сети на основе полученных одновременно за один и тот же интервал наблюдения измерений действующих значений токов и напряжений, а также активных и реактивных мощностей в начале линии и у каждого абонента РЭС, выполняемых средствами АИИС КУЭ, является актуальным и рассматривается в работах [22, 23].

В результате на основе измерений имеющимися средствами АИИС КУЭ проводится расчет достоверных значений сопротивлений межабонентских участков МЛ, с помощью которых могут быть рассчитаны комплексы токов и напряжений на всех участках РЭС. Это позволяет оптимизировать объем вычислительных операций, предлагаемых для расчета векторов тока и напряжения в распределительной сети при НОЭ. В дальнейшем полученные на основе предложенного нами метода данные используются для выявления в РЭС объема НОЭ, обеспечивая оперативный расчет нетехнических потерь электроэнергии в сети. Предложенный метод идентификации сопротивлений межабонентских участков МЛ сети может применяться в специальном программном обеспечении в составе АИИС КУЭ, ориентированном на оперативное выявление объемов НОЭ в РЭС и диагностику ее функционального состояния.

Материалы и методы

Постановка задачи. В работе рассматривается электрическая схема замещения трехфазной распределительной сети напряжением 0,4 кВ (рис. 1). Для упрощения описания ее элементов символом ξ обозначим фазы A, B, C сети ($\xi = A, B, C$); числовым индексом n – количество ответвлений абонентов сети, подключенных к фазе сети ξ ;

v – номер абонента или межабонентского участка фазы сети ξ .

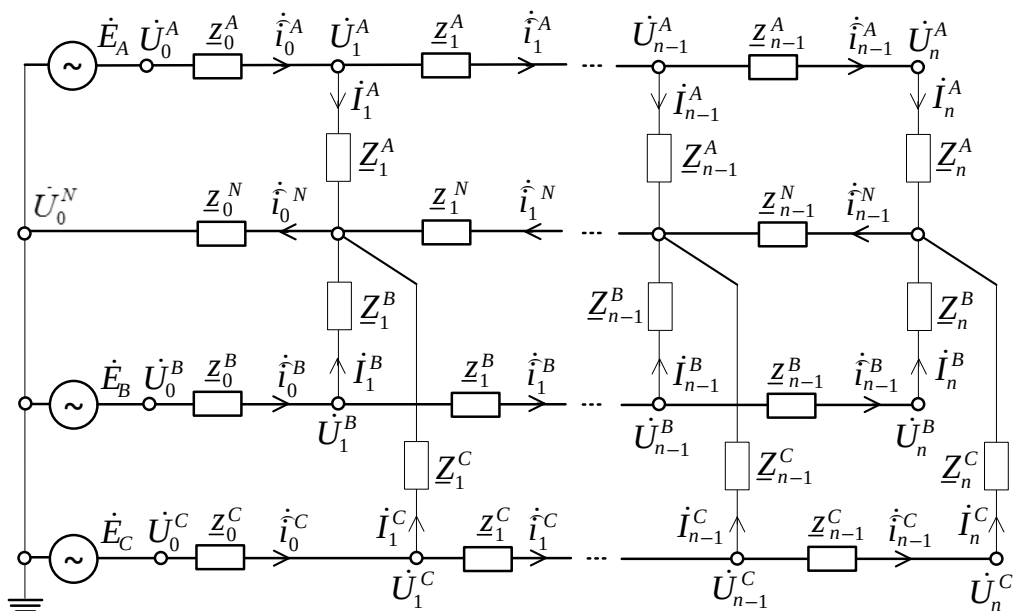


Рис. 1. Электрическая схема замещения распределительной сети

Другие обозначения на рис. 1:

$\dot{E}_\xi = \dot{U}_0^\xi$ – система питающих ЭДС, представленная в комплексном виде;

$\underline{Z}_v^\xi, \underline{Z}_v^N$ – комплексные сопротивления и токи $\dot{i}_v^\xi, \dot{i}_v^N$, соответственно, фазного и

нейтрального проводов v -го межабонентского участка ($v = 0, n-1$) фазы ξ ;

$\dot{U}_v^\xi$, $\dot{I}_v^\xi$ – напряжения и токи в комплексном виде v -го абонента сети ($v = \overline{1, n}$), подключенного к фазе ξ ;

$\underline{Z}_v^\xi$ – сопротивления, учитывающие энергопотребление v -го абонента фазы ξ .

Далее примем следующие допущения:

– распределительная сеть функционирует в штатном (безаварийном) режиме, все ее элементы являются линейными;

– сопротивления межабонентских участков $\underline{Z}_v^\xi$, $\underline{Z}_v^N$ сети являются неизвестными;

– сопротивления фазных и нулевого проводов в пределах одного v -го межабонентского участка трехфазной РЭС одинаковы: $\underline{Z}_v^\xi = \underline{Z}_v^N = \underline{Z}_v$;

– в распределительной сети действует НОЭ, его время действия много больше времени выполняемых для его выявления измерений;

– средствами АИИС КУЭ могут проводиться измерения активной и реактивной мощностей и действующих значений напряжений и токов у всех абонентов сети $p_v^B \xi$,

$p_v^M \xi$, U_v^ξ , I_v^ξ ($v = \overline{1, n}$) и в начале контролируемого участка РЭС $p_0^B \xi$, $p_0^M \xi$, U_0^ξ ,

I_0^ξ ($\xi = A, B, C$), символы «в», «м» у мощностей здесь и далее обозначают, соответственно, вещественные и мнимые части комплексных переменных (отметим, что время, необходимое для измерения действующего значения напряжения или тока, составляет, как минимум, один период, а на практике – несколько, что соответствует интервалу наблюдения порядка 0,1 с);

– периодически по командному сигналу от ГСЭ осуществляются одновременные за один и тот же интервал наблюдения (порядка 0,1 с) измерения указанных выше параметров (отметим, что такие измерения нельзя отнести к определению мгновенных токов [10] в заданный один и тот же момент времени t);

– данные, измеренные СЭА, передаются в ГСЭ, где обрабатываются согласно предлагаемому алгоритму.

Задача заключается в оперативном расчете потерь электроэнергии в РЭС на заданном промежутке времени при условии возможного случайного действия НОЭ и неизвестных сопротивлений межабонентских участков $\underline{Z}_v^\xi$, $\underline{Z}_v^N$.

Методика решения задачи. Реализация поставленной задачи сводится к выполнению следующих этапов:

1. На основе предлагаемого метода для текущего режима РЭС вычисляются комплексы токов $\dot{I}_v^k \xi$, $\dot{I}_v^k N$ и значения сопротивлений $\underline{Z}_v^k \xi$, $\underline{Z}_v^k N$ на всех межабонентских участках ($v = \overline{0, n-1}$, $\xi = A, B, C$). Символ «к» здесь и далее означает параметр, найденный по данным АИИС КУЭ, начиная с «конца» РЭС.

2. Проверка действия НОЭ в РЭС.

3. Для желаемого режима РЭС, в котором отсутствуют НОЭ, рассчитываются достоверные значения сопротивлений межабонентских участков $\underline{Z}_v^\xi$, $\underline{Z}_v^N$, а также

комплексные значения токов $\dot{I}_v^j \xi$, $\dot{I}_v^j N$ ($v = \overline{0, n-1}$) и напряжений $\dot{U}_v^j \xi$, $\dot{I}_v^j \xi$

($v = \overline{1, n}$, $\xi = A, B, C$). Символ «ж» здесь и далее означает параметр «желаемого» режима, найденный по данным, начиная с «конца» РЭС.

4. Найденные в п.3 параметры $\underline{Z}_v^\xi$, $\underline{Z}_v^N$ ($v = \overline{0, n-1}$, $\xi = A, B, C$) и данные показаний мощностей всех СЭА используются при расчете возмущенного режима РЭС, который обнаруживается согласно п.2. При этом находятся комплексы токов и напряжений $\dot{U}_v^B \xi$, $\dot{I}_v^B \xi$ ($v = \overline{0, n}$, $\xi = A, B, C$). Символ «в» у напряжений и токов здесь и далее означает параметр, найденный для возмущенного режима РЭС.

5. Расчет фактических потерь мощности и электроэнергии в РЭС.

Первый этап. Расчет предлагаемым методом комплексов входных токов РЭС и сопротивлений межабонентских участков МЛ.

Начнем расчет с конца рассматриваемой схемы (рис. 1), т.е. с последнего межабонентского участка ($v = n - 1$) РЭС фазы ξ . Примем начальную фазу напряжения

n -го абонента фазы ξ равной нулю: $\tilde{\psi}_n^A = \tilde{\psi}_n^B = \tilde{\psi}_n^C = 0$.

Запишем тогда комплекс указанного напряжения:

$$\dot{U}_n^{\kappa \xi} = U_n^{\xi} e^{j\psi_n^{\xi}},$$

где

$$\psi_n^A = \tilde{\psi}_n^A, \psi_n^B = \tilde{\psi}_n^B - 2\pi/3, \psi_n^C = \tilde{\psi}_n^C + 2\pi/3. \quad (1)$$

Через известные (измеренные СЭА) значения I_n^{ξ} , $p_n^B \xi$, $p_n^C \xi$ определим комплексы токов n -ных абонентов фаз ξ следующим образом:

$$\dot{i}_{n-1}^{\kappa \xi} = \dot{i}_n^{\kappa \xi} = I_n^{\xi} e^{j(\psi_n^{\xi} - \varphi_n^{\xi})},$$

где

$$\varphi_n^{\xi} = \arctg(p_n^M \xi / p_n^B \xi), \xi = \overline{A, B, C}.$$

Представим напряжение для контура с последним межабонентским участком ($v = n - 1$) РЭС фазы ξ так:

$$\dot{U}_{n-1}^{\kappa \xi} = \dot{U}_n^{\kappa \xi} + \left(\dot{i}_n^{\kappa \xi} + \dot{i}_{n-1}^{\kappa N} \right) \underline{z}_{n-1}^{\kappa \xi}, \quad (2)$$

где

$$\dot{i}_{n-1}^{\kappa N} = \dot{i}_{n-1}^{\kappa A} + \dot{i}_{n-1}^{\kappa B} + \dot{i}_{n-1}^{\kappa C}, \underline{z}_{n-1}^{\kappa \xi} = z_{n-1}^{\kappa} e^{j\varphi_{z_{n-1}}^{\kappa}}.$$

Заметим, что, согласно (2), неизвестными для всех фаз ξ распределительной сети являются: $\tilde{\psi}_{n-1}^A$, $\tilde{\psi}_{n-1}^B$, $\tilde{\psi}_{n-1}^C$, z_{n-1}^{κ} , $\varphi_{z_{n-1}}^{\kappa}$. При этом параметры z_{n-1}^{κ} , $\varphi_{z_{n-1}}^{\kappa}$

однозначно определяют остальные неизвестные $\tilde{\psi}_{n-1}^A$, $\tilde{\psi}_{n-1}^B$, $\tilde{\psi}_{n-1}^C$. Поэтому для нахождения неизвестных необходимы только два уравнения.

Запишем выражение (2) для двух произвольных фаз, например, A и C в следующем виде:

$$\underline{z}_{n-1}^{\kappa A} = \frac{\dot{U}_{n-1}^{\kappa A} - \dot{U}_n^{\kappa A}}{\dot{i}_n^{\kappa A} + \dot{i}_{n-1}^{\kappa N}} = \frac{\dot{U}_{n-1}^{\kappa A} - \dot{U}_n^{\kappa A}}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa AN}},$$

$$\underline{z}_{n-1}^{\kappa C} = \frac{\dot{U}_{n-1}^{\kappa C} - \dot{U}_n^{\kappa C}}{\dot{i}_n^{\kappa C} + \dot{i}_{n-1}^{\kappa N}} = \frac{\dot{U}_{n-1}^{\kappa C} - \dot{U}_n^{\kappa C}}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa CN}},$$

где

$$\dot{i}_{n-1}^{\kappa \xi N} = \dot{i}_n^{\kappa \xi} + \dot{i}_{n-1}^{\kappa N} = \dot{i}_{n-1}^{\kappa \xi N} e^{j\alpha_{n-1}^{\kappa \xi N}}, \xi = \overline{A, B, C}.$$

Вследствие того, что по условию задачи $\underline{z}_{n-1}^{\kappa A} = \underline{z}_{n-1}^{\kappa B} = \underline{z}_{n-1}^{\kappa C}$, можно получить (см. рис. 2) систему уравнений с двумя неизвестными z_{n-1}^{κ} , $\varphi_{z_{n-1}}^{\kappa}$:

$$\left(z_{n-1}^{\kappa} \right)^2 + \left(\frac{U_{n-1}^{\kappa A}}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa AN}} \right)^2 - 2z_{n-1}^{\kappa} \frac{U_{n-1}^{\kappa A}}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa AN}} \cos(\hat{\varphi}_{z_{n-1}}^{\kappa A}) = \left(\frac{U_n^{\kappa A}}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa AN}} \right)^2, \quad (3)$$

$$\left(z_{n-1}^{\kappa}\right)^2 + \left(\frac{U_{n-1}^{\kappa} C}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa} CN}\right)^2 - 2z_{n-1}^{\kappa} \frac{U_{n-1}^{\kappa} C}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa} CN} \cos(\hat{\phi}_{z_{n-1}}^{\kappa} C) = \left(\frac{U_n^{\kappa} C}{\dot{i}_{n-1}^{\kappa} CN}\right)^2,$$

где

$$\hat{\phi}_{z_{n-1}}^{\kappa A} = \alpha_{n-1}^{\kappa AN} + \phi_{z_{n-1}}^{\kappa}, \quad \hat{\phi}_{z_{n-1}}^{\kappa C} = \alpha_{n-1}^{\kappa CN} + \phi_{z_{n-1}}^{\kappa}.$$

Решив систему (3), найдем искомые z_{n-1}^{κ} , $\phi_{z_{n-1}}^{\kappa}$ и, соответственно, параметры: $\tilde{\psi}_{n-1}^A$, $\tilde{\psi}_{n-1}^B$, $\tilde{\psi}_{n-1}^C$. Далее с учетом (1) станут известны комплексы напряжений $(n-1)$ -ных абонентов фаз ξ : $\dot{U}_{n-1}^{\kappa \xi} = U_{n-1}^{\xi} e^{j\psi_{n-1}^{\xi}}$, ($\xi = \overline{A, B, C}$).

Далее определим комплексы токов указанных абонентов:

$$\dot{I}_{n-1}^{\kappa \xi} = I_{n-1}^{\xi} e^{j(\psi_{n-1}^{\xi} - \phi_{n-1}^{\xi})}, \quad \xi = \overline{A, B, C},$$

где I_{n-1}^{ξ} , ϕ_{n-1}^{ξ} – известные (измеряются СЭА) параметры.

Переходим к следующему межабонентскому участку ($v = n-2$) РЭС фазы ξ .

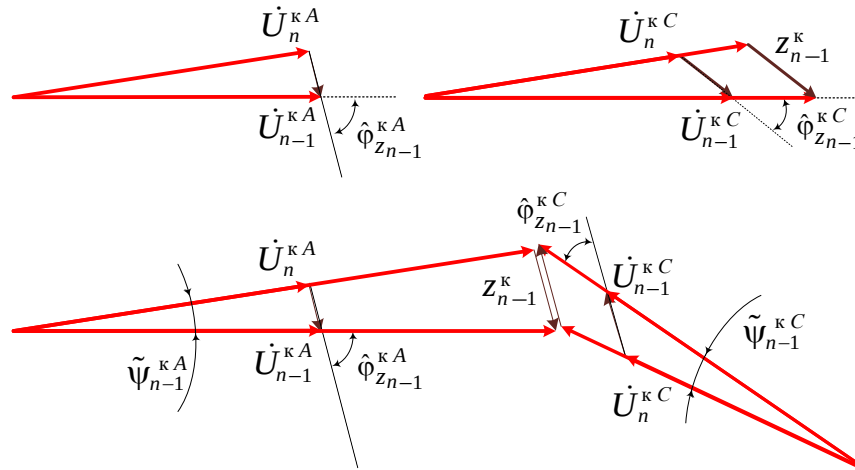


Рис. 2. Графические построения, поясняющие уравнения системы (3)

Найдем комплексы токов $\dot{i}_{n-2}^{\kappa \xi}$, $\dot{i}_{n-2}^{\kappa \xi N}$:

$$\dot{i}_{n-2}^{\kappa \xi} = \dot{i}_{n-1}^{\kappa \xi} + \dot{I}_{n-1}^{\kappa \xi}; \quad \dot{i}_{n-2}^{\kappa \xi N} = \dot{i}_{n-2}^{\kappa \xi} + \dot{i}_{n-2}^{\kappa N} \quad (\xi = \overline{A, B, C}).$$

Дальнейший расчет аналогичен описанному выше для предыдущего межабонентского участка. Таким образом, в результате найдем комплексные значения токов $\dot{I}_0^{\kappa \xi} = \dot{I}_0^{\kappa \xi}$ и входных напряжений $\dot{U}_0^{\kappa \xi}$.

Представим пример расчета режима РЭС предлагаемым в п. 1 методом

Рассмотрим трехфазную электрическую цепь с тремя ($n=3$) ответвлениями абонентов на фазу ξ сети. Воспользуемся исходными данными и результатами расчета режима указанной цепи, представленными в работе [24]. Таким образом, задается режим РЭС, в котором отсутствует НОЭ с фактическими напряжениями $\dot{U}_v^{\phi \xi}$ и токами $\dot{I}_v^{\phi \xi}$.

Модули напряжений $U_v^{\phi \xi}$ и токи $I_v^{\phi \xi}$, а также комплексные мощности абонентов формируют исходные данные, которые будем принимать за измеренные АИИС КУЭ. При этом у третьего абонента фазы A сети моделируется НОЭ путем увеличения сопротивления нагрузки в десять раз, которое становится равным:

$$Z_3^A = 220 \left(0,98 - j\sqrt{1 - (0,98)^2} \right).$$

Таким образом, моделируется возмущенный режим в РЭС, при котором ведется учет СЭА только 10% его фактического тока. Результаты расчетов согласно формулам (1) – (3) для желаемого и возмущенного режимов представлены в табл. 1. Отметим, что для рассматриваемого примера фактические сопротивления всех межабонентских участков

РЭС составляют: $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = 0,0012 + j0,000192 \text{ Ом}$ [24].

Таблица 1

Результаты расчетов параметров режима РЭС по предлагаемому методу

Абоненты сети			Модули и фазы расчетных значений напряжений, токов и сопротивлений в РЭС, получаемых по данным АИИС КУЭ					
№	Фаза сети	Режим работы	U^k , В	ψ^k , эл. град	I^k , А	α^k , эл. град	z^k , Ом	ϕ_z^k , эл. град
0	А	ж	220,0000	0,001037	67,036993	-30,698166	0,001215	9,115353
		в	219,9874	-0,005646	58,622141	-33,587685	0,001455	-5,551228
	В	ж	220,0000	-119,991943	26,333285	-166,571195	0,001215	9,115353
		в	219,9858	-119,994557	26,330526	-166,569156	0,001455	-5,551228
	С	ж	220,0001	119,948780	35,997165	53,569199	0,001215	9,115353
		в	219,9798	119,925690	35,997168	53,560995	0,001455	-5,551228
1	А	ж	219,8580	0,009722	39,974187	-44,990278	0,001215	9,115353
		в	219,8580	0,013632	39,974188	-44,986368	0,001794	-5,551228
	В	ж	220,0048	-120,002257	2,000044	-131,480598	0,001215	9,115353
		в	219,9764	-120,003571	1,999786	-131,481912	0,001794	-5,551228
	С	ж	220,0124	119,972870	10,000566	53,551049	0,001215	9,115353
		в	220,0125	119,950306	10,000570	53,528485	0,001794	-5,551228
2	А	ж	219,7990	0,005853	19,981729	-11,472488	0,001215	9,110009
		в	219,7990	0,011392	19,981729	-11,466949	0,002599	-5,501642
	В	ж	220,0073	-120,000190	20,000666	-165,000190	0,001215	9,110009
		в	219,9794	-119,996772	19,998124	-164,996772	0,002599	-5,501642
	С	ж	219,9925	119,987022	3,999864	53,565200	0,001215	9,110009
		в	219,9925	119,969597	3,999865	53,547776	0,002599	-5,501642
3	А	ж	219,7686	0,000000	9,989481	-11,478341	-	-
	В	В			0,998948	-11,478341		
		Ж						
		В	220,0331	-120,000000	5,000752	173,578178		
	С	Ж						
		В	219,9674	120,000000	21,996736	53,578174		

Второй этап. Проверка несанкционированных отборов электроэнергии в РЭС. Для этого сравниваем модули $\hat{I}_0^{k\xi} = I_0^{k\xi}$ комплексов входных токов $\hat{I}_0^{k\xi} = I_0^{k\xi}$ с действующими значениями, которые измеряются ГСЭ на входе соответствующих фаз ξ сети: $\hat{I}_0^\xi = I_0^\xi$. В случае, если разница токов превышает максимально допустимую абсолютную погрешность измерения токов $\Delta I_{\max}$, то в РЭС наблюдается «возмущенный» режим работы вследствие наличия НОЭ. Отметим, что в рассматриваемом примере для фазы А сети для возмущенного режима (табл. 1) определяется НОЭ, так как получаемое значение тока $I_0^{B A} = 58,622 \text{ А}$ не равно (табл. 2) «фактическому» току $I_0^{\phi A} = 67,037 \text{ А}$. В случае отсутствия НОЭ для желаемого режима ток указанной фазы равен фактическому (см. табл. 1 и 2).

Третий этап

При отсутствии НОЭ в РЭС согласно предлагаемому методу (уравнения (1) – (3)) рассчитываются достоверные значения (см. табл. 1 $\underline{Z}_v^{\text{ж}}$) сопротивлений межабонентских участков $\underline{Z}_v^\xi$, $\underline{Z}_v^N$ ($v = 0, n-1$), которые в дальнейшем используются для расчета

возмущенного режима в РЭС с НОЭ. При этом находим комплексные значения токов $\dot{I}_v^{j\xi}$ и напряжений $\dot{U}_v^{j\xi}$ ($v = 0, n$, $\xi = A, B, C$)

Таблица 2

Фактические и расчетные параметры режима РЭС

Абоненты сети			Модули и фазы фактических и расчетных значений напряжений и токов в РЭС, а также активная и реактивная мощности					
№	Фаза сети	Режим работы	U , В	Ψ , эл. град	I , А	α , эл. град	p^B , Вт	p^M , ВАр
0	A	ф	220,0000	0,000000	67,036993	-30,699189	12681,3269	7529,3782
		ж	220,0000	0,001037	67,036993	-30,698166	12681,3252	7529,3813
		в	220,0000	0,000000	58,598037	-33,593836	10738,4283	7132,9297
	B	ф	220,0000	-120,000000	26,333284	-166,579235	3982,0448	4207,8385
		ж	220,0000	-119,991943	26,333285	-166,571195	3982,0438	4207,8400
		в	220,0000	-120,000000	26,340475	-166,561656	3984,4234	4207,7653
	C	ф	220,0000	120,000000	35,997164	53,620420	3173,1007	7255,8907
		ж	220,0001	119,948780	35,997165	53,569199	3173,1020	7255,8937
		в	220,0000	120,000000	36,001656	53,596340	3170,4465	7258,1292
1	A	ф	219,8580	0,008699	39,974186	-44,991301	6214,5110	6214,5110
		ж	219,8580	0,009722	39,974187	-44,990278	6214,5111	6214,5111
		в	219,9352	0,007684	39,958595	-44,988964	6214,6317	6213,044
	B	ф	220,0048	-120,010306	2,000044	-131,488647	431,2188	87,5627
		ж	220,0048	-120,002257	2,000044	-131,480598	431,2189	87,5627
		в	219,9746	-119,994932	2,001658	-131,423774	431,5831	87,2485
	C	ф	220,0124	120,024084	10,000565	53,602263	880,0994	2016,5610
		ж	220,0124	119,972870	10,000566	53,551049	880,0996	2016,5615
		в	219,9764	120,009585	10,002203	53,612670	880,9759	2016,1781
	A	ф	219,7990	0,004831	19,981729	-11,473510	4304,1252	873,9899
		ж	219,7990	0,005853	19,981729	-11,472488	4304,1253	873,9899
		в	219,9098	0,007958	19,971666	-11,478054	4304,0080	874,5661
	B	ф	220,0073	-120,008229	20,000665	-165,008229	3111,4767	3111,4767
		ж	220,0073	-120,000190	20,000666	-165,000190	3111,4770	3111,4770
		в	219,9516	-119,989889	20,005890	-164,993785	3111,2901	3111,7132
	C	ф	219,9925	120,038240	3,999864	53,616418	351,9760	806,4784
		ж	219,9925	119,987022	3,999864	53,565200	351,9761	806,4785
		в	219,9593	120,016508	4,000469	53,623165	352,3769	806,3036
3	A	ф	219,7686	-0,001025	9,989481	-11,479366	2151,4666	436,8739
		ж	219,7686	0,000000	9,989481	-11,478341	2151,4666	436,8739
		в	219,9086	0,007972	0,998312	-11,477303	215,1414	43,7134
	B	ф	220,0331	-120,008035	5,000752	173,570144	440,1323	1008,4699
		ж	220,0331	-120,000000	5,000752	173,578178	440,1323	1008,4699
		в	219,9483	-119,988557	5,002679	173,579511	439,9544	1008,5476
	C	ф	219,9674	120,051224	21,996736	53,629403	1935,4256	4434,6172
		ж	219,9674	120,000000	21,996736	53,578179	1935,4256	4434,6172
		в	219,9449	120,022368	21,998985	53,584036	1934,1477	4435,1748

Четвертый этап. Расчет согласно [25] комплексных значений токов и напряжений в возмущенном режиме РЭС $\dot{U}_v^{B\xi}$, $\dot{I}_v^{B\xi}$ ($v = 0, n$, $\xi = A, B, C$) с использованием найденных ранее параметров $\underline{Z}_v^\xi$, $\underline{Z}_v^N$ ($v = 0, n - 1$, $\xi = A, B, C$), а также данных показаний мощностей всех СЭА $p_v^{B\xi}$, $p_v^{M\xi}$ ($v = 1, n$, $\xi = A, B, C$) и напряжений источника питания. Результаты расчета для рассматриваемого примера при двух итерациях представлены в табл. 2 (строки, соответствующие возмущенному режиму работы РЭС).

Пятый этап. Расчет фактических потерь мощности и электроэнергии в РЭС. На основе полученных на предыдущем этапе данных определяются потери мощности в РЭС:

$$\Delta P_{РЭС}^{пот} = \left(p_0^{B\Sigma} + jp_0^{M\Sigma} \right) - \sum_{v=1}^n \left(p_v^{B\Sigma} + jp_v^{M\Sigma} \right),$$

где

$$p_0^{B\Sigma} = p_0^{BA} + p_0^{BB} + p_0^{BC}, \quad p_0^{M\Sigma} = p_0^{MA} + p_0^{MB} + p_0^{MC},$$

$$p_v^{B\Sigma} = p_v^{BA} + p_v^{BB} + p_v^{BC}, \quad p_v^{M\Sigma} = p_v^{MA} + p_v^{MB} + p_v^{MC}.$$

При этом $p_0^{B\xi}$, $p_0^{M\xi}$ и $p_v^{B\xi}$, $p_v^{M\xi}$ – мощности ГСЭ и V-го СЭА фаз сети ξ , соответственно, которые находим как:

$$p_0^{B\xi} + jp_0^{M\xi} = \dot{U}_0^{*\phi\xi} \dot{I}_0^{\phi\xi},$$

$$p_v^{B\xi} + jp_v^{M\xi} = \dot{U}_v^{\xi} \dot{I}_v^{\xi} (\cos \phi_v^{\xi} + j \sin \phi_v^{\xi}),$$

$$v = 1, n, \quad \xi = \overline{A, B, C},$$

где $\dot{U}_0^{*\phi\xi}$ – сопряженные комплексы напряжений $\dot{U}_0^{\phi\xi}$.

Нетехнические (коммерческие) потери мощности в РЭС, вызванные НОЭ, определим следующим образом:

$$\Delta P_{РЭС}^{нетехн} = \left(p_0^{B\Sigma} + jp_0^{M\Sigma} \right) - \dot{U}_0^{*B\Sigma} \dot{I}_0^{B\Sigma}, \quad (4)$$

где $\dot{U}_0^{*B\Sigma} \dot{I}_0^{B\Sigma} = \dot{U}_0^{*BA} \dot{I}_0^{BA} + \dot{U}_0^{*BB} \dot{I}_0^{BB} + \dot{U}_0^{*BC} \dot{I}_0^{BC}$, $\dot{U}_0^{*B\xi}$ – сопряженные комплексы напряжений $\dot{U}_0^{B\xi}$.

Мощность технических потерь в РЭС из-за НОЭ для возмущенного режима:

$$\Delta P_{РЭС}^{техн} = \dot{U}_0^{*B\Sigma} \dot{I}_0^{B\Sigma} - \sum_{v=1}^n \left(p_v^{B\Sigma} + jp_v^{M\Sigma} \right). \quad (5)$$

Таким образом, возможным является оперативно определять значения коммерческих (4) и технических потерь (5) мощности в РЭС, вызванных НОЭ. Результаты расчета для рассматриваемого примера:

$$\Delta P_{РЭС}^{пот} = 1952,361 + j483,128 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\Delta P_{РЭС}^{нетехн} = 1943,174 + j394,283 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\Delta P_{РЭС}^{техн} = 9,186 + j88,845 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Рассматривая указанные мощности за интервал наблюдения Δt , можно определять интегральную характеристику – потери электроэнергии в сети [10]. В современных АИИС КУЭ точность расчетов технических и коммерческих потерь электроэнергии в основном определяется частотой дискретизации мгновенных значений измеряемых токов и напряжений и погрешностью вычислений их комплексов. На современном этапе развития науки и техники осуществлять измерения напряжения и тока счетчиком электрической энергии без его существенного удорожания возможно с относительной погрешностью не менее $\pm 0,1\%$ [15]. Проведение расчета (современными микропроцессорными контролерами используемыми АИИС КУЭ) на основе измеренных данных занимает значительно меньше времени по сравнению с временем сбора измеренных данных со счетчиков абонентов, которое в зависимости от используемого канала связи (PLC, GSM и др.) и числа абонентов может составлять от нескольких секунд до 5-7 минут. Таким образом, имеющиеся в АИИС КУЭ средства с помощью предлагаемого метода делают доступным реализацию оперативного расчета потерь в РЭС и выявления в ней количества неучтенной электроэнергии.

Обсуждение результатов

Предлагаемая процедура (алгоритм) оперативного расчета потерь электроэнергии в распределительной сети с неизвестными сопротивлениями межабонентских участков МЛ, на основе данных полученных имеющимися средствами АИИС КУЭ, может выявлять НОЭ в РЭС. Отличительной особенностью от [9] является расчет достоверных сопротивления межабонентских участков МЛ в РЭС, на основе предложенного

оригинального метода, не встречающегося в [9, 10, 16-19, 21-23]. В работе [10] предложен аналогичный подход, где также рассчитываются сопротивления межабонентских участков МЛ в РЭС без НОЭ. Проблема [10] заключается в том, что выявлять НОЭ предлагается, используя измерения мгновенных токов в заданный один и тот же момент времени, а такие измерения не доступны имеющимся средствам АИИС КУЭ.

Заключение

Рассмотрена проблема оперативного расчета потерь электроэнергии в сети с неизвестными сопротивлениями ее межабонентских участков на основе выполняемых АИИС КУЭ одновременных измерений за один и тот же интервал наблюдения, в начале сети и у каждого ее абонента, действующих значений токов и напряжений, а также активной и реактивной мощностей. Предложена методика расчета достоверных сопротивлений межабонентских участков РЭС на основе использованного условия равенства сопротивлений фазных и нулевого проводов в пределах одного межабонентского участка. Указанная методика может использоваться для выявления несанкционированных отборов электроэнергии в распределительной сети. Предварительный расчет сопротивлений межабонентских участков при указанных условиях в режиме реального времени позволяет снизить объем вычислительных операций, необходимых для расчета электрического состояния трехфазной сети и оценки потерь электроэнергии в ней.

Предложенная методика оперативного мониторинга потерь электроэнергии в распределительной сети может найти применение в АИИС КУЭ с уже имеющимися в них средствами, без внесения в них дополнительных измерительных функций.

Литература

1. Tanveer A., Huanxin C., Jiangyu W., at al. Review of various modeling techniques for the detection of electricity theft in smart grid environment // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. pp. 2916-2933.
2. Joaquim L.V., Paulo R.E., Melício R., at al. Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 80. pp. 1256-1268.
3. Yip S.C., Wong K.Sh., Hew W.-P., at al. Detection of energy theft and defective smart meters in smart grids using linear regression // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017. V. 91. pp. 230-240.
4. Tanveer A. Non-technical loss analysis and prevention using smart meters // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 72. pp. 573-589.
5. Bula I., Hoxha V., Shala M., at al. Minimizing non-technical losses with point-to-point measurement of voltage drop between “SMART” meters // IFAC-PapersOnLine. 2016. V. 49, Issue 29. pp. 206-211.
6. Josif V.S., Slobodan S.S., Miroslav B.D., at al. Using the rough set theory to detect fraud committed by electricity customers // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014. V. 62. P. 727-734.
7. Depuru S.S.S.R, Wang L., Devabhaktuni V., at al. High performance computing for detection of electricity theft // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013. V. 47. P. 21-30.
8. Сапронов А.А., Кужеков С.Л., Тынянский В.Г., Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 1. С. 55-58.
9. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. Идентификация и мониторинг потерь электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ // Электричество. 2016. № 11. С. 4-11.
10. Оморов Т.Т., Курманалиева Р.Н., Осмонова Р.Ч. Оценка потерь электроэнергии в условиях неопределенности в составе АСКУЭ. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. № (3-4). С. 126-135.
11. Кононов Ю.Г., Зеленский Е.Г., Жуков М.В., и др. Способ выявления мест возникновения и величин нетехнических потерь энергии в электрических сетях по данным синхронных измерений. Патент РФ на изобретение. № 2651610. 27.12.2016. Бюл. №12.
12. Wenpeng L., Lei Zh., Yixin Y., at al. Low voltage network electricity theft detection method based on AMI data. Patent CN. N. 106405276. 2016.
13. Xin W., Chuan L., Min C., at al. Electricity theft prevention method based on user behavior analysis. Patent CN. N. 106680557. 2017.

14. Данилов М.И., Романенко И.Г., Ястребов С.С. Способ определения мест неконтролируемого потребления электроэнергии в электрической сети 0,4 кВ. Патент РФ на изобретение. № 2700869. 23.01.2019. Бюл. №26.
15. Данилов М.И., Романенко И.Г. Метод выявления мест неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ // Известия вузов. Электромеханика. 2019. Т.62. № 4. С. 90-96.
16. Baumgartner B., Riesch C., Schenk W. The Impact of GPS Vulnerabilities on the Electric Power Grid. XX IMEKO World Symposium, Benevento, Italy, Sept. 2014. pp. 183-188.
17. Grilo A.P., Gao P., Xu W., de Almeida, M.C. Load Monitoring Using Distributed Voltage Sensors and Current Estimation Algorithms // IEEE Trans. Smart Grid. 2014. V. 5. №. 4. pp. 1920-1928.
18. Кононов Ю.Г., Звада П.А. Способ синхронизации измерений в электрических сетях по частоте и фазе напряжения силовой сети. Патент РФ на изобретение № 2619134. 03.12.2015. Бюл. №14.
19. Wu Z., Zora L. T., Phadke A.G. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration // IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver. 2015. pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2015.7286115
20. Šepin M., Demin M., Danilov M., at al. Power System Reliability Importance Measures. 29th European Safety and Reliability Conference, Hannover, 2019. pp. 1633-1637.
21. Zelenskii E.G., Kononov Y.G., Levchenko I.I. Identification of the parameters of distribution networks by synchronized current and voltage measurements // Russian Electrical Engineering. 2016. V. 87. N. 7. P. 363-368.
22. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч., Определение параметров распределительных сетей 0,4 кВ по данным АСКУЭ // Энергетик. 2017. № 6. С. 37-40.
23. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2017. Т. 17, № 1. С. 21-28.
24. Данилов, М.И. К проблеме определения векторов тока и напряжения в распределительной сети по данным АИИС КУЭ / М.И. Данилов, И.Г. Романенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 4. С. 87-94.

Авторы публикации

Данилов Максим Иванович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» Инженерного института Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь. E-mail: mdanilov@ncfu.ru.

Романенко Ирина Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение», Инженерного института Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь. E-mail: irina_romanenko@mail.ru.

References

1. Tanveer A, Huanxin C, Jiangyu W, at al. Review of various modeling techniques for the detection of electricity theft in smart grid environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82:2916-17.
2. Joaquim L.V., Paulo R.E., Melicio R., at al. Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;80. pp. 1256-12.
3. Yip S.C., Wong K.Sh., Hew W.-P., at al. Detection of energy theft and defective smart meters in smart grids using linear regression. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017;91:230-10.
4. Tanveer A. Non-technical loss analysis and prevention using smart meters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;72:573-16.
5. Bula I, Hoxha V, Shala M, at al. Minimizing non-technical losses with point-to-point measurement of voltage drop between “SMART” meters. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(29):206-5.
6. Josif V.S, Slobodan SS, Miroslav BD., at al. Using the rough set theory to detect fraud committed by electricity customers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014;62:727-7.
7. Depuru SS, Wang L, Devabhaktuni V, at al. High performance computing for detection of electricity theft. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2013;47:21-9.
8. Sapronov AA, Kuzhekov SL, Tynyanskiy VG. Expeditious Identification of Uncontrollable Electricity Consumption in Electric Networks up to 1 kV. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika*. 2004;1:55-58.
9. Omorov TT, Takyrbashev BK. Identification and Monitoring of Electric Power Losses in Distributive Network as a Part of ASCAE. *Electricity*. 2016;11:4-11.

10. Omorov TT, Kurmanalieva RN, Osmonova RC. Assessment of Losses of the Electric Power in the Conditions of Uncertainty as a Part of ACSKAE. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):126-135. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-126-135>.
11. Kononov YuG, Zelenskij EG, Zhukov MV, et al. *Sposob vyavleniya mest vozniknoveniya i velichin netekhnicheskikh poter' energii v elektricheskikh setyakh po dannym sinkhronnykh izmereniy*. Patent RUS № 2651610. 27.12.2016. Byul. №12.
12. Wenpeng L, Lei Zh, Yixin Y, et al. Low voltage network electricity theft detection method based on AMI data. Patent CN. N. 106405276. 2016.
13. Xin W, Chuan L, Min C, et al. Electricity theft prevention method based on user behavior analysis. Patent CN. N. 106680557. 2017.
14. Danilov MI, Romanenko IG, Yastrebov SS. *Sposob opredeleniya mest nekontroliruemogo potrebleniya elektroenergii v elektricheskoy seti 0,4 kV*. Patent RUS № 2700869. 23.01.2019. Byul. №26.
15. Danilov MI, Romanenko IG. A Method to Identify Locations of Uncontrolled Electricity Consumption in Electric Networks 0,4 kV. *Russian Electromechanics*. 2019;61(4):90-96.
16. Baumgartner B, Riesch C, Schenk W. The Impact of GPS Vulnerabilities on the Electric Power Grid. *XX IMEKO World Symposium, Benevento, Italy, Sept*. 2014. pp. 183-188.
17. Grilo AP, Gao P, Xu W, de Almeida, M.C. Load Monitoring Using Distributed Voltage Sensors and Current Estimation Algorithms. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2014;5(4):1920-8.
18. Kononov YuG, Zvada PA. *Sposob sinkhronizatsii izmereniy v elektricheskikh setyakh po chastote i faze napryazheniya silovoy seti*. Patent RUS № 2619134. 03.12.2015. Byul. №14.
19. Wu Z, Zora LT, Phadke AG. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver*. 2015. pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2015.7286115.
20. Čepin M, Demin M, Danilov M, et al. Power System Reliability Importance Measures. *29th European Safety and Reliability Conference, Hannover*, 2019. pp. 1633-1637. doi:10.3850/978-981-11-2724-3 0156-cd.
21. Zelenskii EG, et al. Identification of the parameters of distribution networks by synchronized current and voltage measurement. *Russian Electrical Engineering*. 2016;87(7):363-5. doi: 10.3103/S1068371216070129.
22. Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh. Finding the Parameters of 0,4 kV Distribution Grids Based on AEMS Data. *Energetik*. 2017;6:37-40.
23. Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh. On Modelling Unbalanced Distributive Networks Incorporated in ASCAE. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2017;17(1): 21-28. doi: 10.14529/power170103.
24. Danilov MI, Romanenko IG. On Determination of Current and Voltage Vectors in the Distribution Network According to AIMS EMA. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2019;19;4:87-94. doi: 10.14529/power190410.
25. Idel'chik VI. *Elektricheskie sistemy i seti: Uchebnik dlja vuzov*. M.: Jenergoatomizdat, 1989. 592 s.

Authors of the publication

Maksim I. Danilov – Engineering Institute of North Caucasus Federal University, Stavropol. Russia. E-mail: mdanilov@ncfu.ru.

Irina G. Romanenko – Engineering Institute of North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia. E-mail: irina_romanenko_@mail.ru.

Поступила в редакцию

17 октября 2020г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ИЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ОРЕБРЕНИЯ ПРИ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ С ВОЗДУХОМ

Е.С. Данильчик, А.Б. Сухоцкий, В.Б. Кунтыш

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,

Республика Беларусь

E-mail: kattya.156.156@gmail.com

Резюме: Рассмотреть как будет влиять изменение высоты оребрения биметаллических оребренных труб однорядного пучка на тепловые, габаритные и металлоемкостные характеристики в режиме свободной конвекции воздуха при различных углах наклона ($\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ и 90°) к горизонтальной плоскости. Исследуемые трубы имели следующие характеристики: материал несущей трубы – углеродистая сталь (наружный диаметр $d_n = 25$ мм, толщина стенки $\delta = 2$ мм), материал накатной ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М. Геометрические параметры ребер: $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times \varphi \times l = 56,0 \times 26,8 \times 14,6 \times 2,5 \times 0,5 \times 19,3 \times 300$ мм (I тип). Исследования проводились методом полного теплового моделирования на специально разработанном экспериментальном стенде. Затем ребра стачивались путем шлифования с образованием новых типов труб (II–VI), которые компоновались в однорядный пучок с постоянным относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1 / d = 1,14 = \text{const}$. В статье получены критериальные зависимости по теплоотдаче оребренного однорядного пучка из труб с различной высотой оребрения при разных углах наклона к горизонтальной плоскости, а также графическая зависимость поправочного коэффициента на угол наклона пучка ($\gamma = 0-90^\circ$). Установлено, что увеличение угла наклона и высоты оребрения труб однорядного пучка в целом сопровождается снижением теплоотдачи. По габаритным и металлоемкостным характеристикам наиболее эффективным является однорядный пучок при различных углах наклона к горизонтальной плоскости с высотой оребрения трубы 2,0 мм.

Ключевые слова: биметаллическая оребренная труба, однорядный трубчатый теплообменник, число Релея, число Нуссельта, критериальное уравнение теплоотдачи, углы наклона к горизонту, высота оребрения, габаритные и металлоемкостные характеристики, свободная конвекция.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант № ГБ 20-052), а также Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты T19PM-076 и 19-58-04-006Бел_мол_a).

Для цитирования: Данильчик Е.С., Сухоцкий А.Б., Кунтыш В.Б. Экспериментальные исследования эффективности однорядного пучка из биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №5. С.128-141. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-128-141.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFICIENCY OF A SINGLE-ROW BUNDLE OF BIMETALLIC FINNED TUBES WITH DIFFERENT FINNING HEIGHTS IN FREE CONVECTIVE HEAT EXCHANGE WITH AIR

ES Danil'chik, AB Sukhotski, VB Kuntysch

Belarussian state technological university, Minsk, Republic of Belarus

E-mail: katya.156.156@gmail.com

Abstract: Considerer the influence of a change in the height of the finning of bimetallic finned tubes of a single-row bundle on the thermal, overall and metal-capacity characteristics in the mode of free air convection at different angles of inclination ($\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ and 90°) to the horizontal plane. The investigated tubes have the following characteristics: the material of the supporting tube was carbon steel (outer diameter $d_{out} = 25$ mm, wall thickness $\delta = 2$ mm), the material of the rolling finned shell was aluminum alloy AD1M. Geometric parameters of the fins: $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times \varphi \times l = 56,0 \times 26,8 \times 14,6 \times 2,5 \times 0,5 \times 19,3 \times 300$ mm (type I). The studies were carried out by the method of complete thermal modeling on a specially designed experimental stand. Then the fins were ground by grinding with the formation of new types of tubes (II–VI), which were assembled into a single-row bundle with a constant relative transverse pitch $\sigma_1 = S_1 / d = 1,14 = \text{const}$. The article describes the criterion dependences for heat transfer of a finned single-row bundle of tubes with different finning heights at different angles of inclination to the horizontal plane, as well as a graphical dependence of the correction factor for the angle of inclination of bundle ($\gamma = 0–90^\circ$) were obtained. It has been established that an increase in the angle of inclination and the height of the finning of tubes of a single-row bundle is generally accompanied by a decrease in heat transfer. In terms of overall and metal-capacity characteristics, the most effective is a single-row bundle at various angles of inclination to the horizontal plane with a tube finning height 2,0 mm.

Keywords: bimetallic finned tube, single-row tubular heat exchanger, Rayleigh number, Nusselt number, criterion equation for heat transfer, tilt angles to the horizon, finning height, overall and metal capacity characteristics, free convection.

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus (Grant No. GB 20-052), as well as the Belarusian Republican Foundation for Basic Research and the Russian Foundation for Basic Research (projects T19RM-076 and 19-58-04-006Bel_mol_a).

For citation: Danil'chik ES, Sukhotski AB, Kuntysch VB. Experimental studies of the efficiency of a single-row bundle of bimetallic finned tubes with different finning heights in free convective heat exchange with air. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):128-141. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-128-141.

Введение

Воздухоохлаждаемые теплообменники (ВОТ) применяются в различных отраслях промышленности для охлаждения технологических продуктов и энергоносителей. Однорядные пучки нашли распространение в системах отопления в качестве калориферов и системах утилизации сбросного тепла.

В настоящее время ВОТ в основном эксплуатируются в режиме вынужденной конвекции, который позволяет значительно увеличить коэффициент теплопередачи и тем самым снизить габариты теплообменника. Но эксплуатация таких ВОТ требует значительного потребления энергии на привод вентиляторов.

Одним из способов решения проблемы энергосбережения является перевод данных ВОТ в режим свободной конвекции без затрат электроэнергии на привод вентиляторов. Главным недостатком данных ВОТ является малые коэффициенты теплопередачи и существенные габаритно-массовые характеристики. Поэтому очень актуальны углубленные исследования

эксплуатации ВОТ в режиме свободной конвекции, которые связаны с разработкой энергоэффективной поверхности теплообмена ВОТ в данном тепловом режиме.

Литературный обзор

Ю. А. Короленко определил средние коэффициенты теплоотдачи к воздуху естественной конвекцией однорядного пучка горизонтальных гладких труб диаметром d [1]. Было установлено, что при относительном шаге труб $S_1/d > 1,82$ влияние соседних труб не ощущается и теплоотдачу можно рассчитывать по зависимостям для одиночной горизонтальной трубы. При $1,36 \leq S_1/d \leq 1,82$ влияние соседних труб друг ощущается при $Gr > 3200$. При более тесном расположении горизонтальных труб влияние соседних труб на теплоотдачу конвекцией ощущается при всех значениях чисел Грасгофа, что существенно уменьшает коэффициент теплоотдачи по сравнению с одиночной трубой. Однако следует учитывать, что при обработке данных была применена несовершенная методика учета лучистой составляющей теплового потока, которая доходила в опытах до 60%. Полученные выводы не согласуются также с исследованиями С. Е. Гусева [2], проведенными для пучка горизонтальных цилиндров в воде, в которых полученные для относительных шагов труб $S_1/d > 1,25$ и $2,0$ коэффициенты теплоотдачи оказались на 12 и 3% выше, чем у одиночного цилиндра при тех же числах Релея.

В работе [3] приведены результаты исследования теплоотдачи однорядного пучка ребристых труб с коэффициентом оребрения $\phi = 15,23$ при свободной конвекции. Опыт выполнялся при относительных шагах труб $S_1/d = 1,035-4,0$, где d – диаметр оребрения. При этом оси труб располагались под углами $0, 45$ и 90° к горизонтальной плоскости. Опытные серии аппроксимированы степенными уравнениями в интервале чисел Релея $Ra = (3,5-11,4) \cdot 10^4$. Анализ результатов исследования показал, что при одинаковых относительных шагах труб S_1/d теплоотдача уменьшается с возрастанием угла наклона пучка. Для горизонтального пучка наибольшая теплоотдача соответствует шагу $S_1/d = 1,135$, а для наклоненных пучков – $S_1/d = 1,25$. Отмечается, что для каждого относительного шага в пределах $S_1/d = 1,25-2,0$ существует критическое значение числа Релея, до которого теплоотдача трубы в пучке развивается по законам свободной конвекции одиночной оребренной трубы. К сожалению, в данной работе неверно учитывался тепловой поток излучением, так как приведенная степень черноты принималась равной нормальной степени черноты алюминиевой поверхности в диапазоне $0,07-0,15$ в зависимости от температуры и не учитывалось влияние переизлучения между трубами.

В работе [4] проведены исследования свободноконвективной теплоотдачи однорядного пучка ребристых труб с коэффициентом оребрения $\phi = 16,8$ для относительных межтрубных шагов $S_1/d = 1,043-1,799$ и углов наклона к горизонтальной поверхности $0, 15, 30, 45$ и 60° . Предельный интервал изменения числа Релея $Ra = (3-40) \cdot 10^4$. Теплоотдача излучением составляла 20–35% от суммарного теплового потока. Обнаружено, что во всем диапазоне шагов теплоотдача горизонтального пучка выше, чем у одиночной трубы на 20–50% при тех же числах Релея. При этом имеется максимум теплоотдачи в интервале шага $S_1/d = 1,097-1,151$. Рост теплоотдачи в интервале шага $S_1/d = 1,043-1,799$ объяснялся увеличением относительной площади проходного сечения и возрастанием скорости потока. Увеличение межтрубного шага $S_1/d > 1,151$ вызывало уменьшение взаимодействия пограничных слоев соседних труб, что в пределе приведет к достижению минимума теплоотдачи пучка соответствующей теплоотдачи одиночной оребренной трубы. Увеличение угла наклона до 15° практически не оказывает влияние на теплоотдачу пучка. Дальнейшее увеличение угла наклона до 60° вызывало снижение конвективной теплоотдачи на 37–47% обусловленное ухудшением условий обтекания воздухом межреберного пространства. Подобные результаты получены в работе [5] для однорядного горизонтального пучка ребристых труб с коэффициентом оребрения $\phi = 14,5$ для относительных межтрубных шагов $S_1/d = 1,027-2,14$. Максимум теплоотдачи достигался в интервале шага $S_1/d = 1,084-1,17$. При всех шагах труб и во всем диапазоне чисел Ra пучки имеют на 16–80% более высокую теплоотдачу по сравнению с одиночной трубой.

В работе [6] приведены результаты исследования теплоотдачи однорядного горизонтального пучка ребристых труб с коэффициентом оребрения $\phi = 21$ при свободной конвекции для относительных межтрубных шагов $S_1/d = 1,036-1,25$. В результате анализа полученных экспериментальных данных у авторов сформировалась определенная физическая картина структуры потока воздуха, проходящего через однорядный горизонтальный оребренный пучок. Поток воздуха, проходящий через пучок, условно можно разделить на три части: межреберный, обтекающий и межтрубный.

Межреберный поток движется в полостях между ребрами трубы и за счет большой поверхности контакта имеет наибольший отбор тепла и, соответственно, максимальное повышение температуры. При этом он обладает также максимальной подъемной силой, обусловленной низкой весовой плотностью, но из-за малого проходного сечения этот поток воспринимает максимальное сопротивление движению. Обтекающий поток нагревается за счет взаимодействия с поверхности торцов ребер и смешивается с межреберным потоком. Его поведение и характеристики во многом идентичны с потоком, обтекающим гладкую трубу с диаметром равным диаметру оребрения экспериментальной трубы. Сопротивление его движению главным образом оказывает взаимодействие с межтрубным потоком воздуха. Межтрубный поток, по сути, является паразитным, т. к. практически неподвижен при свободной конвекции, препятствует движению обтекающему потоку и непосредственно не участвует в охлаждении трубного пучка.

При больших поперечных шагах дополнительное аэродинамическое сопротивление движению обтекающему потоку создает практически неподвижный межтрубный поток и обтекание трубы воздухом аналогично обтеканию одиночной трубы. При уменьшении шага снижается межтрубное поперечное сечение и соответственно уменьшается влияние паразитного межтрубного потока. При оптимальных шагах $S_1/d = 1,09-1,14$ межтрубный холодный поток отсутствует, обтекающий поток соседних труб объединяется в единый поток. При малых же поперечных шагах обтекающий поток оказывается зажатым между трубами и его расход снижается, что ведет к снижению теплоотдачи ниже, чем теплоотдача у одиночной трубы (при $S_1/d < 1,036$).

Таким образом, можно сделать вывод, что на основе проведенных исследований [1–6] сформировались ясные представления о влиянии межтрубного шага на теплоотдачу гладкого и оребренного однорядного пучка. Однако имеющиеся экспериментальные данные не позволяют сформулировать однозначное мнение о влиянии параметров оребрения однорядного пучка на эффективность теплообмена. Имеется только небольшое количество работ посвященных изучению влияния высоты оребрения h и шага ребра s на свободно-конвективный теплообмен одиночной оребренной трубы [7–13].

Материалы и методы

Цель работы – экспериментальные исследования влияния высоты оребрения биметаллических оребренных труб однорядного пучка на тепловые, габаритные и металлоемкостные характеристики в режиме свободной конвекции воздуха при различных углах наклона ($\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ и 90°) к горизонтальной плоскости.

Опыты проводились на однорядных пучках из шести биметаллических оребренных труб со спиральными (круглыми) накатными ребрами со следующими исходными геометрическими параметрами: наружный диаметр оребрения $d = 56,0$ мм; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,8$ мм; высота ребра $h = 14,6$ мм; шаг ребра $s = 2,5$ мм; средняя толщина ребра $\Delta = 0,5$ мм; коэффициент оребрения трубы $\phi = 19,3$ (I тип, $h/s = 5,84$). Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь, длина трубы $l_n = 330$ мм (теплоотдающая длина $l = 300$ мм). Диаметр несущей трубы $d_n = 25$ мм, толщина стенки $\delta = 2$ мм. Однорядный пучок из I-го типа труб собирался из оребренных труб с поперечным шагом установки $S_1 = 64$ мм.

Для изменения высоты оребрения труб их ребра стачивались путем шлифования с образованием новых типов труб (рис. 1), при этом компоновка однорядных пучков производилась с постоянным относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1/d = 1,14 = \text{const}$: II тип – $h = 12,0$ мм; $d = 50,8$ мм; $\phi = 15,1$; $S_1 = 57,9$ мм ($h/s = 4,80$); III тип – $h = 8,0$ мм; $d = 42,8$ мм; $\phi = 9,4$; $S_1 = 48,8$ мм ($h/s = 3,20$); IV тип – $h = 4,1$ мм; $d = 35,0$ мм; $\phi = 4,8$; $S_1 = 39,9$ мм ($h/s = 1,64$); V тип – $h = 2,0$ мм; $d = 30,8$ мм; $\phi = 2,8$; $S_1 = 35,1$ мм ($h/s = 0,80$); VI тип – $h = 0-0,2$ мм; $d = 26,8$ мм; $\phi \approx 1$ (условно гладкая труба); $S_1 = 30,6$ мм ($h/s \approx 0$). После шлифовки всех ребер были получены условно гладкие трубы с элементами дискретной шероховатости вследствие повреждения поверхности основания ребер и межреберных каналов абразивом шлифовальной бумаги (рис. 1, справа), которую проблематично было удалить из-за небольшой толщины алюминиевого основания (0,9 мм). В работе [7] были проведены тарировочные опыты, которые подтвердили, что теплообменные свойства, полученных нами условно гладких труб соответствуют свойствам обычной гладкой трубы

при правильном учете лучистой составляющей [4, 14].



Рис. 1. Образцы экспериментальных труб типов I–VI для однорядных пучков

Исследования проводились методом полного теплового моделирования на специально разработанном в [15] экспериментальном стенде для исследования теплообмена пучков с воздушным потоком. Для этого во внутрь каждой трубы пучка соосно с помощью центровочного кольца вставлялся, изготовленный на ОАО «Минский завод тэнов», стальной теплоэлектронагреватель (ТЭН) диаметром $d_{\text{ТЭН}} = 12,5$ мм, максимальной мощностью 320 Вт. Для равномерного прогрева трубы между ТЭНом и стенкой засыпался кварцевый песок дисперсным составом 0,16–0,32 мм. Для снижения торцевых потерь на концах труб однорядного пучка применялся теплоизолирующий короб с минеральной ватой [16].

Схема экспериментальной установки (рис. 2), аппаратное оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов подробно изложены в [15–16].

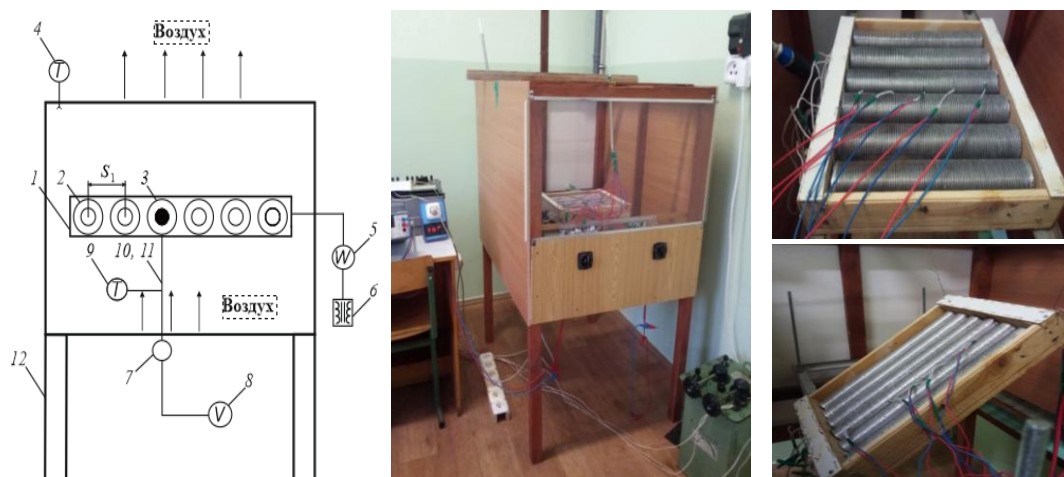


Рис. 2. Схема и фото экспериментальной установки

1 – камера; 2 – однорядный пучок; 3 – труба-калориметр; 4 – лабораторный термометр; 5 – ваттметры, 6 – масляной трансформатор; 7 – переключатель; 8 – вольтметр; 9 – сосуд Дьюара; 10 – хромель-алюмелевые термопары; 11 – четырехспайные медь-константановые термопары; 12 – опоры

Во время экспериментального исследования однорядного пучка электрическая мощность, подводимая к трубам, изменялась в пределах $W = 6\text{--}230$ Вт, средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_{\text{ст}} = 30\text{--}250^\circ\text{C}$, а температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 16\text{--}27^\circ\text{C}$. Теплофизические свойства воздуха λ , ν , α определяли по температуре окружающего воздуха в камере t_0 . За определяющий размер был принят диаметр трубы по основанию ребер d_0 .

По данным измерений рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности оребренной трубы, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{ct} - t_0) \cdot F}, \quad (1)$$

где Q_k – конвективный тепловой поток, Вт; t_{ct} – средняя температура поверхности стенки у основания ребер труб пучка, °C; t_0 – температура окружающего воздуха, °C; $F = l \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \phi$ – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м².

Тепловой поток, отведенный от трубы к воздуху конвекцией, Вт, рассчитывался из уравнения

$$Q_k = W - Q_{\text{л}} - Q_{\text{п.к}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{л}}$ – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху и шахте, Вт; $Q_{\text{п.к}}$ – тепловые потери через торцы труб и токоподводы при использовании короба с минеральной ватой, Вт.

Для определения тепловых потерь через торцы труб, для минимизации которых использовался теплоизолирующий короб с минеральной ватой, были проведены предварительные опыты с горизонтальными гладкой цилиндрической алюминиевой трубой 25×2 мм и оребренной биметаллической трубой типа I. В работе [14] нами были проведены тарировочные опыты по определению тепловых потерь через торцы трубы при использовании фторопластовых втулок, где для всех типов труб I–VI были получены соответствующие уравнения для определения тепловых потерь в виде $Q_{\text{п}} = f(W)$. Зная эти зависимости для гладкой трубы и оребренной трубы I-го типа, экспериментально устанавливали ряд значений суммарного теплового потока $Q_{\text{сум}} = Q_k + Q_{\text{л}}$, Вт и далее по уравнению (2) обратным методом находили значение тепловых потерь $Q_{\text{п.к}} = W - Q_{\text{сум}}$, Вт. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

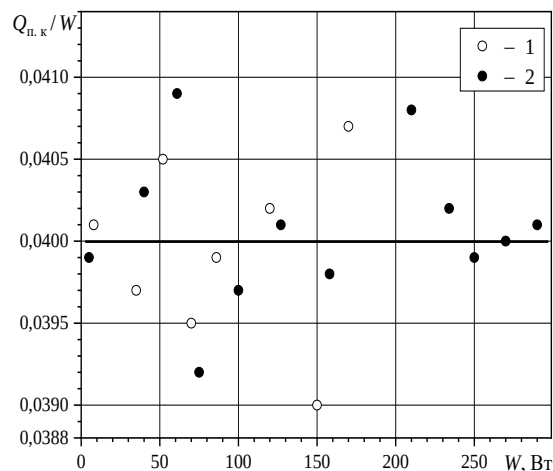


Рис. 3. Результаты эксперимента по определению тепловых потерь $Q_{\text{п.к}}$, Вт, от подаваемой к трубе электрической мощности W , Вт: 1 – гладкая труба; 2 – оребренная биметаллическая труба I-го типа

Из рис. 3 следует, что тепловые потери через торцы труб и токопроводы при использовании теплоизолирующего короба с минеральной ватой для труб, как для гладкой, так и для оребренной, составляют $\approx 4\%$ от электрической мощности, подаваемой на трубу-калориметр ($Q_{\text{п.к}} \approx 0,04 \cdot W$, Вт).

Количество теплоты переданного излучением, Вт, при упрощенном методе согласно [4] с небольшим дополнением, что температура поверхности камеры, пола и потолка вокруг пучка равна температуре окружающего воздуха, $t_k = t_0$, °C, рассчитывалось по формуле

$$Q_{\text{л}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{\text{т-с}} \varphi_{\text{г.п-с}} F \left[\left(\frac{273 + t_{ct}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_k}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы тел пучок–среда; $\varphi_{\text{т-с}}$ – средний угловой коэффициент излучения одиночной ребристой трубы к окружающей среде и $\varphi_{\text{г.п-с}}$ – средний угловой коэффициент излучения от гладкотрубного пучка к окружающей среде определялись по [4].

Для определения приведенной степени черноты в работе [14] опытным путем для труб с каждой высотой оребрения (типы I–VI) из которых составлялись однорядные пучки, определяли эффективную степень черноты $\varepsilon_{\text{эф}}$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[1 + (1/\varepsilon_{\text{эф}} - 1)\varphi_{\text{г.п-с}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Результаты эксперимента представлялись в виде зависимости числа Нуссельта от числа Релея

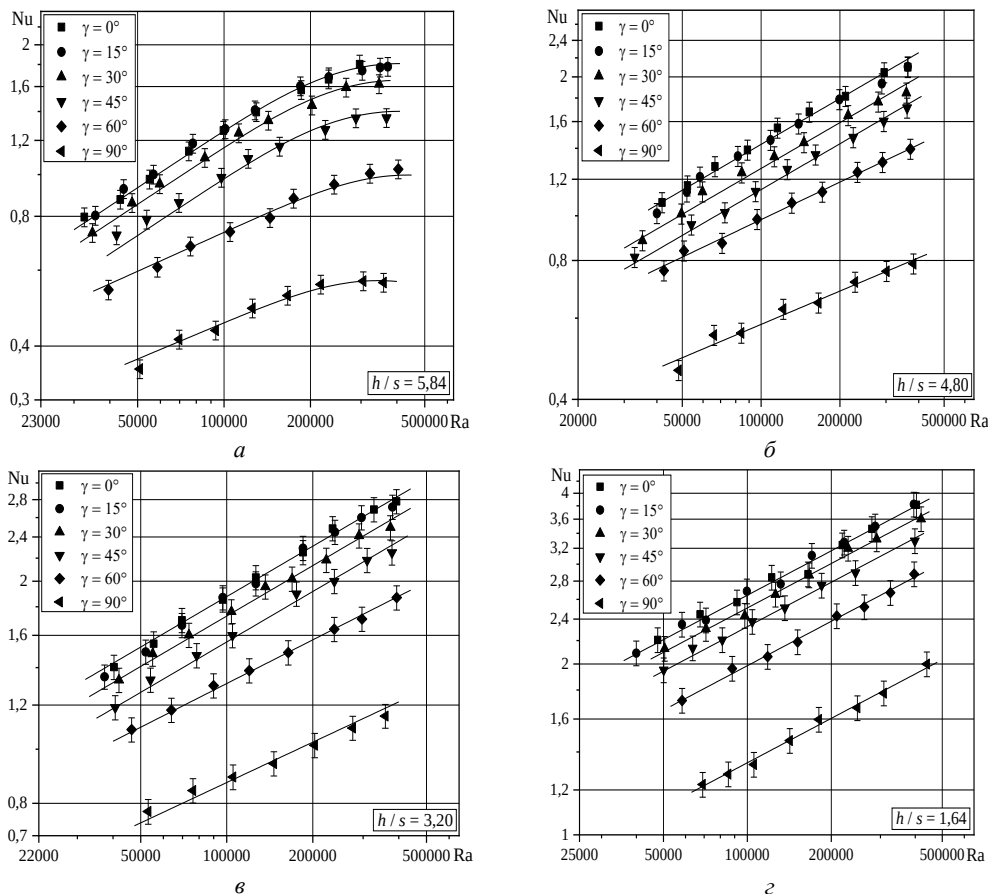
$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot d_0}{\lambda}, \quad (5)$$

$$\text{Ra} = \text{Gr Pr} = \frac{g\beta d_0^3 (t_{\text{ст}} - t_0)}{\nu a}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; β – коэффициент температурного расширения, К^{-1} ; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Результаты и обсуждения

Результаты экспериментального исследования свободно-конвективной теплообмена однорядных пучков из ребристых труб с различной высотой оребрения при разных углах наклона γ к горизонтальной плоскости представлены на рис. 4.



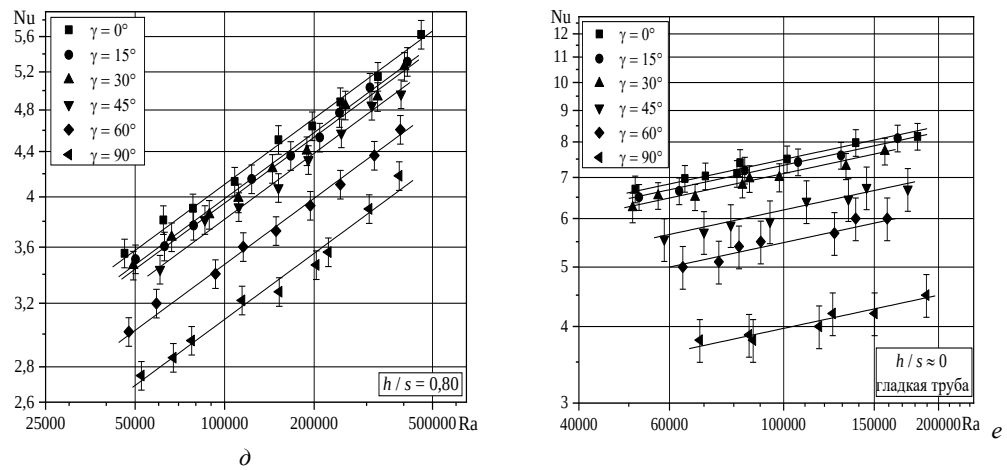


Рис. 4. Теплоотдача в режиме свободной конвекции воздуха однорядных пучков из труб экспериментальных типов: а) – I тип, б) – II тип, в) – III тип, г) – IV тип, д) – V тип, е) – VI тип, при различных углах наклона $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ и 90°

Экспериментальные данные по теплоотдаче однорядного пучка из труб I-го типа с высотой оребрения $h = 14,6$ мм при различных углах наклона γ , представленных на рис. 4 а, с отклонением, не превышающим 5–7%, аппроксимированы уравнением вида, где коэффициент B для углов $\gamma = 0, 15, 30, 45^\circ$ составил $6 \cdot 10^5$, для $\gamma = 60^\circ - 9 \cdot 10^5$, а для $\gamma = 90^\circ - 7,5 \cdot 10^5$

$$Nu = A \cdot Ra^n (1 - \exp(-B / Ra)) \quad (7)$$

При этом степенной вид зависимости с экспоненциальным отклонением по уравнению (7) совпадает с исследованиями работ [4, 6] по свободной конвекции трубных шахматных пучков из биметаллических оребренных труб.

Остальные экспериментальные данные по теплоотдаче однорядных оребренных пучков при различных углах наклона γ на рис. 4 б–д, с отклонением для однорядных пучков из труб II-го и III-го типов 5–7%, IV-го и V-го типов – 10% и VI-го типа – 15%, аппроксимированы традиционной функцией вида

$$Nu = A \cdot Ra^n \quad (8)$$

Значения постоянных A, n в уравнениях (7) и (8) представлены в табл. 1, где номер типа труб в зависимости от высоты оребрения соответствует номеру однорядного пучка.

Таблица 1

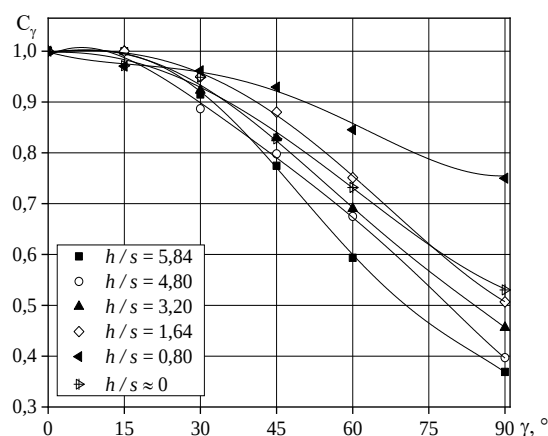
Значения постоянных A, n в уравнениях (7) и (8) и диапазоны применимости по числу Ra для теплоотдачи однорядного пучка при постоянном относительном поперечном шаге $\sigma_1 = S_1 / d = 1,14 = \text{const}$ в режиме свободной конвекции

Тип трубы (пучка)	I	II	III	IV	V	VI гладкая труба (пучок)
h , мм (ф)	14,6 (19,3)	12,0 (15,1)	8,0 (9,4)	4,1 (4,8)	2,0 (2,8)	0–0,2 (1)
h / s	5,84	4,80	3,20	1,64	0,80	≈ 0
Диапазон $Ra \cdot 10^{-5}$	0,33–4,05	0,33–3,82	0,37–3,59	0,4–4,20	0,46–4,58	0,51–1,89
$\gamma = 0^\circ$						
A	0,0080	0,032	0,059	0,133	0,411	0,943
n	0,44	0,33	0,30	0,26	0,2	0,18
$\gamma = 15^\circ$						
A	0,0080	0,032	0,059	0,133	0,399	0,923
n	0,44	0,33	0,30	0,26	0,2	0,18
$\gamma = 30^\circ$						
A	0,073	0,028	0,055	0,126	0,395	0,894
n	0,44	0,33	0,30	0,26	0,2	0,18

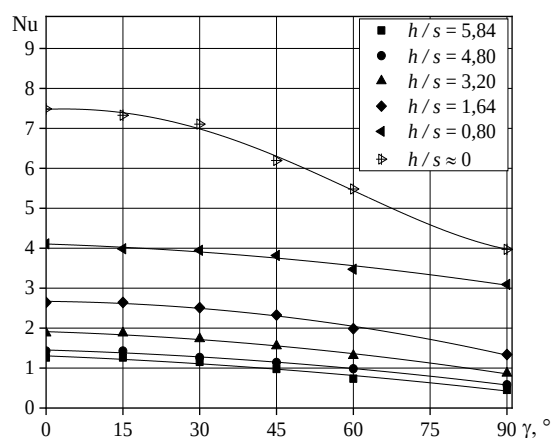
Продолжение таблицы 1

$\gamma = 45^\circ$						
A	0,0062	0,026	0,049	0,117	0,382	0,780
n	0,44	0,33	0,30	0,26	0,2	0,18
$\gamma = 60^\circ$						
A	0,023	0,044	0,066	0,099	0,347	0,690
n	0,30	0,27	0,26	0,26	0,2	0,18
$\gamma = 90^\circ$						
A	0,018	0,037	0,055	0,067	0,309	0,500
n	0,28	0,24	0,24	0,26	0,2	0,18

На рис. 5 представлена графическая зависимость поправочного коэффициента $C_\gamma = Nu_\gamma / Nu_{\gamma=0^\circ}$ на угол наклона γ для различных типов экспериментальных однорядных пучков, где числа Nu при соответствующих числах Ra вычислялись по уравнениям (7) и (8). Данный коэффициент C_γ определялся как среднее арифметическое расчетных точек на исследовательском диапазоне $Ra = 33000\text{--}458000$. Отклонение кривых $C_\gamma = f(\gamma)$ от экспериментальных данных на рис. 4 составило 3% за исключением точек, где происходит смена степени n функции $Nu = f(Ra)$ в пределах однорядного пучка с одной высотой оребрения при различных углах γ (см. табл. 1), тогда отклонение при $\gamma = 60$ и 90° составляет 7–10%.

Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента C_γ на угол наклона γ к горизонтальной плоскости для однорядных пучков различных типов I–VI

На рис. 6 представлены рассчитанные по (7) и (8) зависимости при числе $Ra = 100000$ для сравнения тепловой эффективности теплоотдачи в режиме свободной конвекции однорядного оребренного пучка разной относительной высоты h/s (типы I–VI) при различных углах наклона γ .

Рис. 6. Зависимость числа Nu от угла наклона γ к горизонтальной плоскости для однорядного оребренного пучка различной относительной высоты h/s (типы I–VI) при числе $Ra = 100000$

Из данных, представленных на рис. 4–6, видно, что увеличение угла наклона однорядного пучка различных типов I–VI в целом сопровождается снижением теплоотдачи.

При вертикальном расположении однорядного пучка с различной высотой оребрения по сравнению с его горизонтальным расположением для типов I, II, III, IV и VI она уменьшается приблизительно в 2–1,8 раза, а для типа V – в 1,4 раза. При этом для пучков типов I–IV теплоотдача горизонтального пучка и под углом $\gamma = 15^\circ$ одинакова, а для пучков V и VI типов схожа с работой [4]. Отметим, что теплоотдача для всех типов пучков под углом $\gamma = 30^\circ$ не сильно снижается по сравнению с ее значениями при горизонтальном расположении пучка: I–IV тип приблизительно на 8–10%, а V и VI тип – на 5–6%.

На рис. 4–6 видно, что свободно-конвективная теплоотдача с уменьшением высоты оребрения труб пучка при различных углах наклона γ возрастает, что логично для данных оребренных труб с малым шагом ребра $s = 2,5$ мм. Это объясняется тем, что при уменьшении высоты оребрения труб пучка площадь теплоотдающей оребренной поверхности уменьшается, при этом конвективный тепловой поток менее ограничен при тесном шаге ребра для свободной конвекции воздуха ребрами по бокам.

В настоящее время, в промышленности, доступное пространство, отведенное на размещение теплообменных аппаратов, зачастую ограничено, следовательно, вопрос компактности теплообменников выходит на передний план. Поэтому, в данной работе была проведена оценка габаритных характеристик теплообменных пучков в режиме свободной конвекции с помощью показателя объемной плотности конвективной теплоотдачи A_v , Вт/м³, полученного на основе работ [17–19] и определяемого по формуле

$$A_v = \frac{Q_k}{V_r \cdot (t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k \cdot (t_{ct} - t_0) \cdot F}{V_r \cdot (t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k \cdot F}{V_r}, \quad (9)$$

где $V_r = l \cdot S_1 \cdot d$ – габаритный объем трубы, м³.

Для оценки рациональности использования алюминия, из которого изготавливается оребрение для труб теплообменных пучков, была произведена оценка их металлоемкостных характеристик с помощью показателя массовой плотности конвективной теплоотдачи A_g , Вт/кг, полученного на основе работы [19], рассчитываемого как

$$A_g = \frac{Q_k}{G \cdot (t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k \cdot (t_{ct} - t_0) \cdot F}{G \cdot (t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k \cdot F}{G}, \quad (10)$$

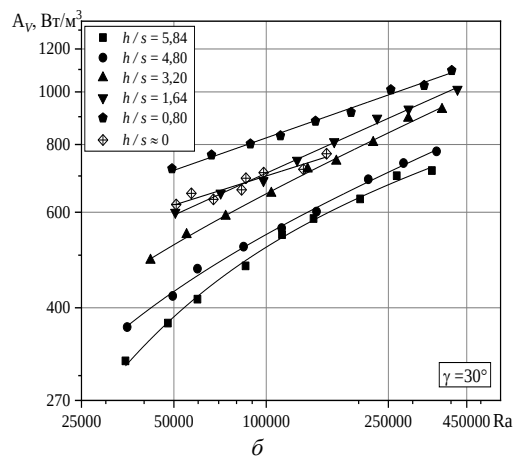
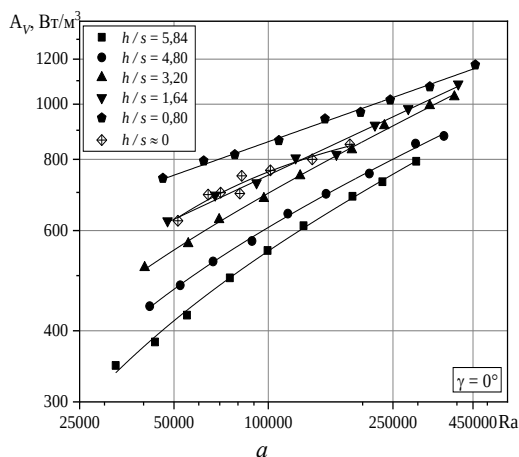
G – масса алюминиевого оребрения одной трубы, кг.

Масса алюминиевого оребрения одной трубы определялся по выражению, м³

$$G = \rho_{Al} \cdot (V_k + V_n) \cdot m = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d^2 - d_0^2) \cdot \Delta \cdot m + (d_0^2 - d_n^2) \cdot l \right], \quad (11)$$

где $\rho_{Al} = 2700$ кг/м³ – плотность алюминия; V_k – объем колец ребер трубы, м³; V_n – объем алюминиевой подложки трубы, м³; $m = l/s$ – количество алюминиевых ребер трубы, шт.

Результаты оценки по объемной и массовой плотности конвективной теплоотдачи от числа Релея исследуемых однорядных пучков представлены на рис. 7, 8.



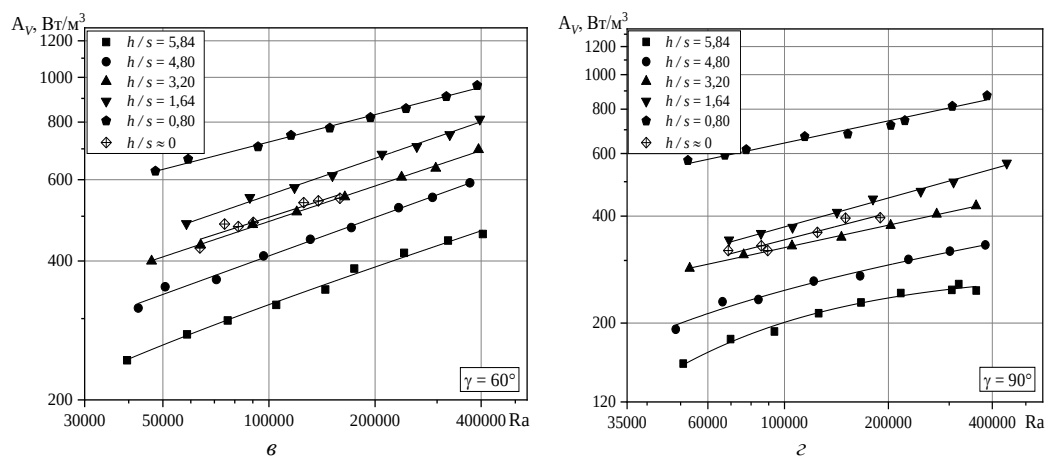


Рис. 7. Графическая зависимость объемной плотности конвективной теплоотдачи от числа Релея для однорядных пучков различных типов I-VI при разных углах наклона γ : а) – 0° , б) – 30° , в) – 60° , г) – 90°

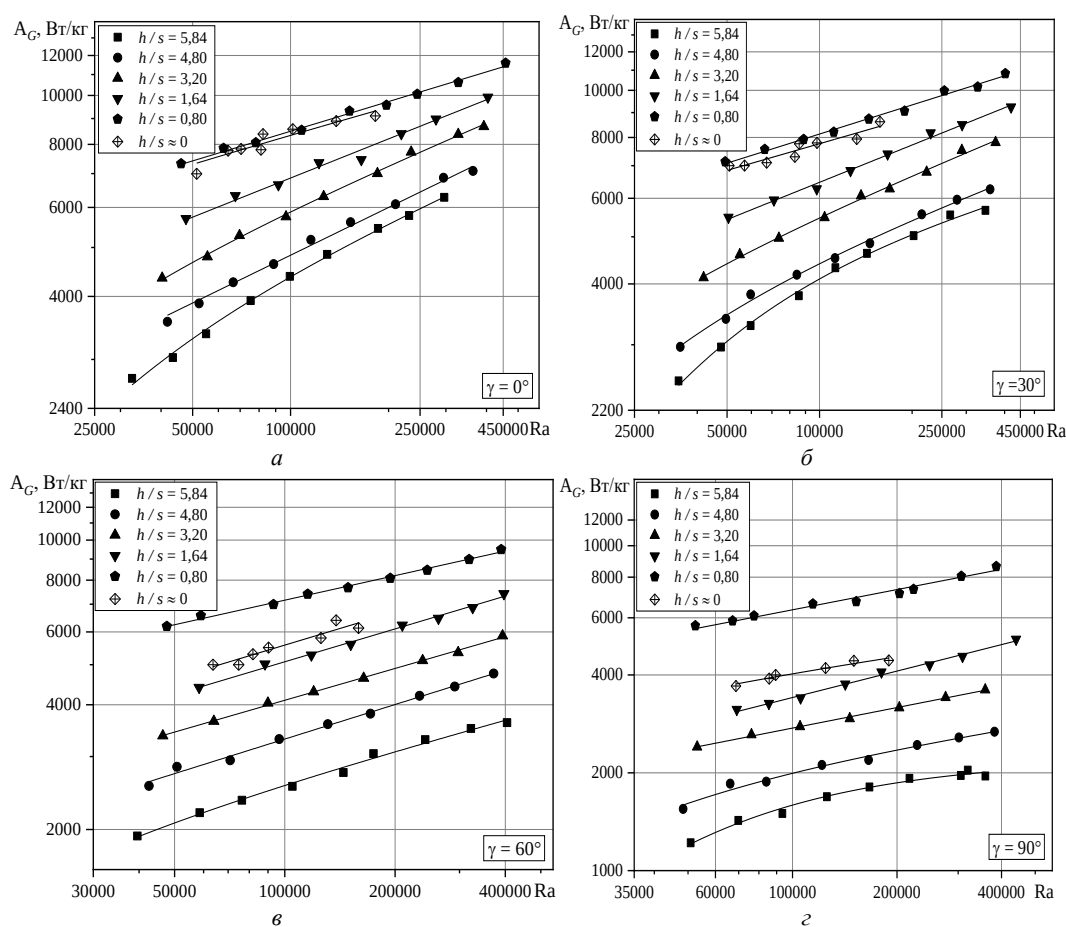


Рис. 8. Графическая зависимость массовой плотности конвективной теплоотдачи от числа Релея для однорядных пучков различных типов I-VI при разных углах наклона γ : а) – 0° , б) – 30° , в) – 60° , г) – 90°

Из анализа рис. 7, 8 однорядных оребренных пучков при углах наклона $\gamma = 0, 30$ и 60° к горизонтальной плоскости, наиболее распространенных в промышленности, а также вертикального пучка ($\gamma = 90^\circ$) следует, что наиболее энергетически выгодным с учетом занимаемого габаритного пространства и экономически целесообразным по использованию алюминиевого оребрения является однорядный пучок с высотой оребрения труб $h \approx 2,0$ мм.

Выводы

1. Проведен комплекс экспериментальных исследований конвективной теплоотдачи однорядных пучков из труб с различной высотой оребрения при разных углах наклона к горизонтальной плоскости в режиме свободной конвекции воздуха.

2. Проведены экспериментальные исследования по определению величины тепловых потерь на торцах труб при использовании теплоизолирующего короба с минеральной ватой, которые составляют $\approx 4\%$ от подаваемой мощности на трубу W , Вт.

3. Получены критериальные зависимости по теплоотдаче оребренного однорядного пучка из труб с различной высотой оребрения при разных углах наклона к горизонтальной плоскости, а также графическая зависимость поправочного коэффициента на угол наклона пучка ($\gamma = 0-90^\circ$).

4. Установлено, что увеличение угла наклона и высоты оребрения труб однорядного пучка в целом сопровождается снижением теплоотдачи. При этом в промышленности кроме горизонтальных пучков можно использовать однорядные оребренные пучки различных типов I–VI размещенных под углами $\gamma = 15$ и 30° .

5. По габаритным и металлоемкостным характеристикам наиболее эффективным является однорядный пучок при различных углах наклона к горизонтальной плоскости типа V с высотой оребрения трубы $h \approx 2,0$ мм.

Литература

1. Короленко Ю. А. Теплопередача горизонтального пучка труб к воздуху в условиях свободной конвекции // Известия Томского политехнического института. 1962. Т. 110. С. 26-33.
2. Гусев С. Е. Теплообмен и гидродинамика при свободно-конвективном обтекании горизонтальных цилиндрических тел теплоносителем с переменными физическими свойствами: дис. ...докт. техн. наук: 01.04.14. Москва, 2000. 426 с.
3. Кунтын В. Б., Топоркова М. А. Метод расчета подогрева сушильного воздуха при свободной конвекции воздуха в калориферах из труб с накатными ребрами // Актуальные направления развития суши древесины: тез. докл. к Всесоюз. конф. 8–12 сент. 1980 г. Архангельск, 1980. С. 203-207.
4. Самородов А.В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ...канд. техн. наук: 05.14.14. Архангельск, 1999. 176 с.
5. Волков А.В. Повышение эффективности сушки длительносохнущих пиломатериалов в камерах периодического действия: дис. ...канд. техн. наук: 05.21.05 / А. В. Волков. – Архангельск, 2003. 154 с.
6. Сухоцкий А.Б. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб / Сухоцкий А.Б., Сидорик Г.С. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №19. С. 3-11.
7. Yildiz, Ş. An experimental investigation on performance of annular fins on a horizontal cylinder in free convection heat transfer / Ş. Yildiz, H. Yüncü // Heat and Mass Transfer. 2004. V. 40. P. 239-251.
8. Hahne, E. Natural convection heat transfer on finned tubes in air / E. Hahne, D. Zhu // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1994. Vol. 37. P. 59-63.
9. Kayansayan, N. Natural convection heat transfer coefficient for a horizontal cylinder with vertically attached circular fins / N. Kayansayan, R. Karabacak // Heat Recovery Systems & CHP. 1992. – V. 12. N. 6. pp. 457-468.
10. Senapati, J.R., Dash K., Roy S. Numerical investigation of natural convection heat transfer over annular finned horizontal cylinder. Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 96. – pp. 330-345.
11. Senapati, J.R., Dash K., Roy S. Numerical investigation of natural convection heat transfer from vertical cylinder with annular fins // Int. J. of Thermal Sciences. 2017. V. 111. pp. 146-159.
12. Chen H.-T., Chou H.-Y., H.-Ch., et. Al. Numerical study on natural convection heat transfer over annular finned tube heat exchanger in chimney with experimental data // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 127. pp. 483-496.
13. Данильчик Е. С., Сухоцкий А.Б. Экспериментальные исследования влияния угла наклона оребренной трубы на свободно-конвективную теплоотдачу теплообменников воздушного охлаждения // Энергоэффективность. 2020. № 7. С. 16-20.
14. Данильчик Е. С. Экспериментальные исследования теплоотдачи одиночной биметаллической ребристой трубы с различной высотой оребрения к воздуху в режиме свободной конвекции // Тепло- и массоперенос – 2019. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 2020. С. 42-52.
15. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Труды БГТУ. Серия 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возоб. рес. 2018. № 1. С. 85-93.
16. Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Исследование свободно-конвективного теплообмена оребренной трубы и однородного пучка при различных углах наклона труб к горизонтальной

плоскости // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2. С. 272–279.

17. Unger S., Krepper E., Hampel U. Numerical analysis of heat exchanger designs for passive spent fuel pool cooling to ambient air // Nuclear Engineering and Design. 2018. V. 333. pp. 224-234.

18. Experimental study of the natural convection heat transfer performance for finned oval tubes at different tube tilt angles / S. Unger, M. Beyer, J. Thiele [et. al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. V. 105. pp. 100-108.

19. Данильчик, Е. С. Интенсификация свободно-конвективной теплоотдачи круглоребристой трубы и однорядного пучка из этих труб с различной высотой ребрения / Е. С. Данильчик // Международная молодежная научная конференция «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)»: материалы конференции. Сборник докладов, Казань, 7–8 ноября 2019 г.: в 6 т. / КНИТУ-КАИ. Казань: изд-во ИП Сагеева А. Р., 2019. Т. 2. С. 205-211.

Авторы публикации

Данильчик Екатерина Сергеевна – аспирант, ассистент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники, Белорусский государственный технологический университет.

Сухоцкий Альберт Борисович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники Белорусский государственный технологический университет.

Кунтыш Владимир Борисович – д-р техн. наук, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники Белорусский государственный технологический университет.

References

1. Korolenko YA. Heat transfer of a horizontal tube bundle to the air under free convection. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute*. 1962;110:26-33.

2. Gusev SE. *Heat exchange and hydrodynamics in free-convective flow around horizontal cylindrical bodies with a heat carrier with variable physical properties*: dis. ... doct. techn. sciences: 01.04.14. Moscow, 2000.

3. Kuntyn VB., Toporkova MA. Method for calculating the heating of drying air with free air convection in heaters made of tubes with rolling fins. *Current trends in the development of wood drying: TEZ. Dokl. to the all-Union. Conf. September 8–12, 1980*. Arkhangelsk, 1980. pp. 203–207.

4. Samorodov AV. *Improvement of methods of thermal calculation and design of air cooling devices with chess finned bunches*: dis. ... cand. tech. sciences: 05.14.14. Arkhangelsk, 1999. 176 p.

5. Volkov AV. *Improving the efficiency of drying long-drying lumber in batch chambers*: dis. ... cand. tech. science: 05.21.05. Arkhangelsk, 2003. 154 p.

6. Sukhotsky AB, Sidorik GS. Investigation of mixed-convective heat transfer of single-row air-cooled heat exchangers at different transverse steps of pipe installation. *News of higher educational institutions. Energy problem*. 2017; 19:3–11. doi: 10.30724/1998-9903-2017-19-11-12-3-11.

7. Yildiz Ş, Yüncü H. An experimental investigation on performance of annular fins on a horizontal cylinder in free convection heat transfer. *Heat and Mass Transfer*. 2004; 40:239–251. doi: 10.1007/S00231-002-0404-X.

8. Hahne E, Zhu D. Natural convection heat transfer on finned tubes in air. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1994; 37:59-63.

9. Kayansayan N, Karabacak R. Natural convection heat transfer coefficient for a horizontal cylinder with vertically attached circular fins. *Heat Recovery Systems & CHP*. 1992; 12(6):457-468.

10. Senapati JR, Dash SK, Roy S. Numerical investigation of natural convection heat transfer over annular finned horizontal cylinder. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2016; 96:330-345. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.024.

11. Senapati JR, Dash SK, Roy S. Numerical investigation of natural convection heat transfer from vertical cylinder with annular fins. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2017;111:146-159. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2016.08.019.

12. Chen H.-T, Chou H.-Y, Tseng H.-Ch, et al. Numerical study on natural convection heat transfer over annular finned tube heat exchanger in chimney with experimental data. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2018; 127:483-496. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2018.08.055.

13. Danilchik ES, Sukhotsky AB. Experimental studies of the influence of the angle of inclination of a finned tube on the free convective heat transfer of air-cooled heat exchangers. *Energy efficiency*. 2020;7:16-20.

14. Danilchik ES. Experimental studies of heat transfer of a single bimetallic finned pipe with different fin heights to air in the free convection mode. *Heat and mass transfer – 2019*. 2020. pp. 42-52.

15. Sidorik GS. Experimental stand for studying thermal and aerodynamic processes of mixed-convective heat exchange of round-ribbed pipes and bundles. *Proceedings of BSTU. Series 1. Lesn. household, nature management. and pererab. resume.* 2018;1:85-93.
16. Sukhotsky AB, Danilchik ES. Investigation of free-convective heat exchange of a finned pipe and a homogeneous beam at different angles of inclination of tubes to the horizontal plane. *Proceedings of BSTU. Ser. 1. Forestry, nature management and processing of renewable resources.* 2019;2:272-279.
17. Unger S, Krepper E, Hampel U. Numerical analysis of heat exchanger designs for passive spent fuel pool cooling to ambient air. *Nuclear Engineering and Design.* 2018; 333:224-234. doi:10.1016/j.nucengdes. 2018.04.011.
18. Unger. S, Beyer M, Thiele J, et. al. Experimental study of the natural convection heat transfer performance for finned oval tubes at different tube tilt angels. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2019; 105:100-108. doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.03.016.
19. Danilchik ES. Intensification of free-convective heat transfer of a round-ribbed pipe and a single-row beam from these pipes with different fin heights. *International youth scientific conference "XXIV Tupolev readings (school of young scientists)": conference materials. Collection of reports, Kazan, November 7–8, 2019: in 6 vols. KNITU-KAI. Kazan: publishing house of IP Sagieva A. R., 2019. V. 2. pp. 205-211.*

Authors of the publication

Danilchik Ekaterina Sergeevna – Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University.

Sukhotski Al'bert Borisovich – Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University.

Kuntysh Vladimir Borisovich – Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University.

Поступила в редакцию

09 ноября 2020г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 62-83:501.1

DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н.А. Малёв¹, А.И. Мухаметшин¹, О.В. Погодицкий¹, П.В. Чичков²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²АО «Казанский Гипроннавиапром», г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Задача анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей в переходных и установившихся режимах является актуальной на этапах проектирования и эксплуатации. Программные продукты для регистрации и обработки измерительной информации, а также проведения необходимых технических вычислений, такие как LabView, MatLab Simulink и другие открывают широкие возможности для решения поставленной задачи и позволяют получить достоверные результаты. *МЕТОДЫ.* В работе проводится исследование электромеханических преобразователей постоянного тока со встроенными тахогенераторами, измерение и фиксация выходных координат которых обеспечивается экспериментальными установками различной конфигурации с последующей обработкой результатов контроля функционирования с применением прикладных программ. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработанные экспериментальные установки различаются по составу и стоимости аппаратного обеспечения, необходимости применения того или иного программного сопровождения, форме представления результатов контроля функционирования объектов исследования и точности полученных результатов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Настоящее исследование направлено на сравнительный анализ двух экспериментальных установок, позволяющих получить математические модели электромеханических преобразователей постоянного тока, необходимые для реализации метода контроля функционирования, с точки зрения материальных затрат на аппаратно-программное обеспечение, времени обработки результатов эксперимента и соответствия полученных результатов требуемой точности формирования математических моделей.

Ключевые слова: *двигатель постоянного тока, анализ, эксперимент, математическая модель, моделирование, переходные процессы, аппаратно-программное обеспечение.*

Для цитирования: Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 5. С. 142-154. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154.

COMPARATIVE ANALYSIS OF HARDWARE AND SOFTWARE OF THE MONITORING METHOD OF FUNCTIONING ELECTROMECHANICAL DC CONVERTERS

NA. Malev¹, AI. Mukhametshin¹, OV. Pogoditsky¹, PV. Chichkov²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²JSC «Kazan Giproniaviaprom», Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. The task of analysis and monitoring of the functioning of electromechanical converters in transient and static modes is relevant at the design and operation stages. Software products for recording and processing measurement information, as well as for performing the necessary technical calculations, such as LabView, MatLab Simulink and others, offer great opportunities for solving the task and allow obtaining reliable results. METHODS. The study of electromechanical DC converters with built-in tachogenerators carried out, the measurement and fixing of the output coordinates of which is provided by experimental sets of various configuration with subsequent processing of the results of functional monitoring using application programs. RESULTS. The developed experimental sets differ in the composition and cost of hardware, the need to use one or another software support, the form of presenting the results of monitoring the functioning of research objects and the accuracy of the results. CONCLUSION. The present study aimed at a comparative analysis of two experimental sets. These sets allow obtaining mathematical models of electromechanical DC converters necessary for the implementation of the monitoring method of the functioning. The analysis performed from the point of view of material costs for hardware and software, the processing time of the experimental results and the correspondence of the obtained results to the required accuracy of the formation of mathematical models.

Keywords: DC motor, analysis, experiment, mathematical model, modeling, transients, hardware and software.

For citation: Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, Chichkov PV. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):142-154. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154.

Введение

Задача анализа влияния нестабильных параметров на качество функционирования электромеханических преобразователей в составе рабочих комплексов путем вычисления соответствующих оценок [1,2,3] является актуальной задачей, поскольку позволяет определить отклонения реальных значений параметров объектов исследования от проектных (расчетных), обеспечивающих требуемое качество функционирования [4,5,6,7]. Компьютерные технологии на основе современных прикладных программ открывают возможность более глубокого изучения вопросов, связанных с разработкой методов анализа динамических свойств электромеханических преобразователей, а также подходов и алгоритмов контроля функционирования электрических машин в процессе эксплуатации. В первую очередь к таким прикладным программам следует отнести пакеты *MatLab* с широко развитыми техническими приложениями (*Simulink*, *Simscape* и др.), виртуальную лабораторию *LabView*, табличный процессор *Excel* и т.п. программы, которые позволяют существенно усовершенствовать технологию исследования электромеханических преобразователей и применить экспериментально-аналитический метод к их анализу с последующим получением качественных оценок параметров объектов исследования [8,9,10,11]. Обработка результатов эксперимента кроме программных средств требует наличия соответствующей аппаратной составляющей, в частности датчиков входных и выходных координат электромеханических преобразователей, аналого-цифровых преобразователей и различных средств сопряжения объектов исследования с персональным компьютером.

Методы

Для контроля функционирования электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации целесообразно использовать уточненную математическую модель объекта, полученную по результатам исследований с применением экспериментальной установки. В качестве объектов исследования рассматриваются общепромышленный двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г, а также серводвигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов типа *PIVT-6-25/3A*. Паспортные данные двигателей сведены в табл. 1, 2[3,12]. Оба двигателя укомплектованы встроенными тахогенераторами.

Таблица 1

Паспортные данные двигателя 4ПБ112М2Г

$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	$I_{a1}, А$	$\eta_{ном}, \%$	$n_1, об/мин$	$2p$	$n_{max}, об/мин$	$J_{ном}, кг \cdot м^2$
220	3	16,2	80	3000	2	4000	0,0235

Таблица 2

Паспортные данные двигателя PIVT-6-25/3A						
$U_{ном}$, В	K_m , Н·м/А	T_a , с	M_{max} , Н·м	T_m , с	n_2 , об/мин при $M = M_{max}$	I_{a2} , А при $M = M_{max}$
30	0,072	0,002	0,225	0,025	3000	4,5

Измерение активного сопротивления якорной цепи произведено с помощью измерительного моста постоянного тока типа ММВ с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$. Результаты измерения составили, соответственно:

$$\begin{aligned} R_{a1} &= 1,358 \text{ Ом;} \\ R_{a2} &= 5,15 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (1)$$

Индуктивности якорных обмоток определены на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} L_{a1} &= k_i \frac{30 U_{ном}}{\pi p I_{ном} n_{ном}} = 0,5 \frac{30 \cdot 220}{\pi \cdot 2 \cdot 16,2 \cdot 3000} = 0,0108 \text{ Гн;} \\ L_{a2} &= T_a R_{a2} = 0,002 \cdot 5,15 = 0,0103 \text{ Гн,} \end{aligned} \quad (2)$$

где $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ – электромагнитная постоянная времени.

Коэффициенты противо-ЭДС

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{U_{ном} - I_{ном} R_{a1}}{\omega_{ном}} = \frac{220 - 16,2 \cdot 1,358}{314} = 0,63 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад;} \\ c_2 &= K_m = 0,072 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад.} \end{aligned} \quad (3)$$

Момент инерции двигателя PIVT-6-25/3A определим на основании известной электромеханической постоянной времени

$$T_m = \frac{J_{ном} R_a}{c^2}, \text{ откуда } J_{ном2} = \frac{T_m c_2^2}{R_a} = \frac{0,025 \cdot 0,072^2}{5,15} = 2,516 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (4)$$

Передаточная функция двигателя постоянного тока, выраженная через параметры [1, 3]:

$$W_{дв}(s) = \frac{\Omega_{ном}(s)}{U_{ном}(s)} = \frac{1/c}{\frac{L_a J_{ном}}{c^2} s^2 + \frac{R_a J_{ном}}{c^2} s + 1}. \quad (5)$$

Задача использования экспериментальных установок состоит в регистрации динамических характеристик электромеханических преобразователей и проверке соответствия полученных результатов математической модели вида (5).

Схема экспериментальной установки для исследования двигателя 4ПБ112М2Г показана на рис. 1.

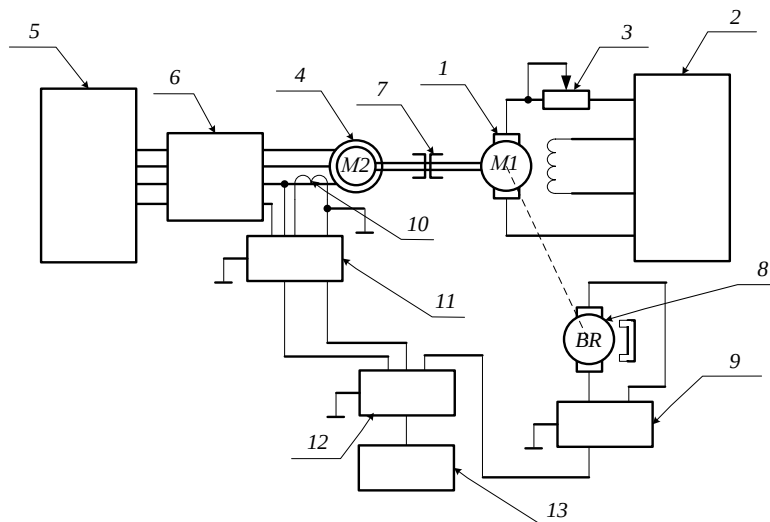


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования электрических машин с обработкой информации в среде Labview: 1 – двигатель постоянного тока; 2 – станция управления ДПТ; 3 – реостат; 4 – асинхронный двигатель; 5 – станция управления АД; 6 – комплектное измерительное устройство; 7 – муфта; 8 – тахогенератор; 9 – делитель напряжения; 10 – трансформатор тока; 11 – блок согласования; 12 – аналого-цифровой преобразователь; 13 – персональный компьютер

Установка включает в себя испытуемый двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) *M1* типа 4ПБ112М2ГУХЛ4 с жестко установленным на валу тахогенератором ТП80-20-0,2. Вал двигателя с помощью двух упругих втулочно-пальцевых полумуфт 7 соединен с асинхронным электродвигателем (АД) типа АИР90Л2У2. ДПТНВ 1 и АД 4 жестко закреплены на станине посредством болтовых соединений. При необходимости двигатели могут быть разъединены. Управление работой ДПТНВ производится со станции управления 2. В якорной цепи ДПТНВ предусмотрена возможность подключения добавочных сопротивлений и индуктивностей. Управление АД осуществляется со станции управления 5. Для калибровки измерительных каналов в силовую цепь управления АД подключается переносное комплектное измерительное устройство К50 6. В качестве датчика скорости в измерительном канале используется входящий в состав ДПТНВ тахогенератор 8, с крутизной статической характеристики 20 мВ·мин. Сигнал с тахогенератора поступает на делитель напряжения 9 с коэффициентом передачи 0,0167 и далее на вход восьмиканального последовательного аналогово-цифрового преобразователя напряжения NI 4472 12 с частотой дискретизации 20 кГц, который, в свою очередь, подключен к шине *PCI* персонального компьютера. Измерение тока, протекающего по фазному проводу АД, производится при помощи трансформатора тока (ТТ) УТТ-5 10, с коэффициентом трансформации 0,1. Ток со вторичной обмотки ТТ подается в блок согласования 11, который состоит из преобразователя тока ZMCT 103С, преобразователя напряжения ZMPT 101В и двух операционных усилителей LM358. Кроме того, на блок согласования 11 подводится фазное напряжение АД. Данный блок выполняет операцию формирования информационных сигналов на выходах операционных усилителей для последующей обработки в АЦП.

На рис. 2 показана функциональная схема экспериментальной установки для исследования серводвигателя постоянного тока типа *PIVT-6-25/3А* с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным тахогенератором с крутизной выходного напряжения 3 мВ·мин. Двигатель получает питание от однофазного двухполупериодного мостового стабилизированного выпрямителя типа ВСА-5К.

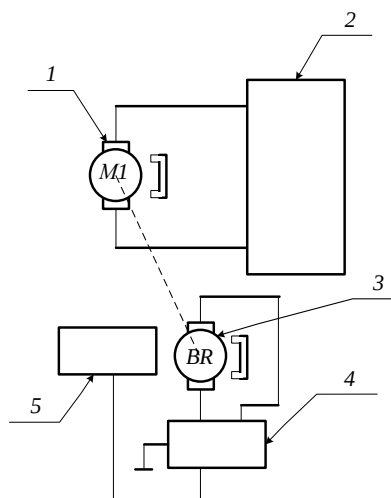


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования электрических машин с обработкой информации с помощью платформы *Arduino Nano*:
1 – двигатель постоянного тока; 2 – станция управления ДПТ; 3 – тахогенератор;
4 – микроконтроллер; 5 – персональный компьютер

Обработка результатов измерения осуществляется с помощью платформы *Arduino Nano* на микроконтроллере *ATmega 328*, поддерживающим последовательный интерфейс *UARTTTL* (5 В). Установленная на платформе микросхема *FTDI232RL* передает данный интерфейс через *USB*, а драйверы микросхемы предоставляют виртуальный *COM*-порт программе на персональном компьютере.

Результаты и обсуждение

Для анализа переходных процессов с применением функциональной схема на рис. 1 разработан виртуальный прибор в среде графического программирования *NI Labview* [13,14], позволяющий измерить выходные координаты ДПТНВ.

Виртуальный прибор состоит из лицевой панели, служащей для визуализации показаний и соответствующей программы в виде блок-диаграммы (рис. 3).

Блок-диаграмма содержит в своем составе блок сбора данных, блок распределения, блок первичной обработки, блоки визуализации и блоки архивирования. Для

конфигурирования измерительных каналов служит блок «DAQ Assistant», который позволяет индивидуально настраивать частоту опросов измерительных каналов. Блоки «Select Signals» служат для разделения входных сигналов. Учет преобразований сигналов с датчиков и их калибровка производится при помощи блоков суммирования и умножения с выставлением калибровочных коэффициентов. Визуализация измерений производится блоками Scope (на рис. 3 блоки «Speed», «Voltage», «Current»). Блоками «Write to Measurement File» осуществляется архивирование замеров.

Экспериментальные замеры переходных процессов при пуске двигателя постоянного тока типа 4ПБ112М2ГУХЛ4 осуществлялись при отсоединенном АД. Результаты эксперимента при пуске холостую при номинальных значениях параметров якорной цепи были сохранены в ПЗУ персонального компьютера в форме таблицы, содержащей 20000 строк [15].

Следует отметить, что для обработки результатов эксперимента в среде Excel написана соответствующая программа, обеспечивающая рациональный выбор количества экспериментальных точек, не влияющий на снижение точности результатов [16].

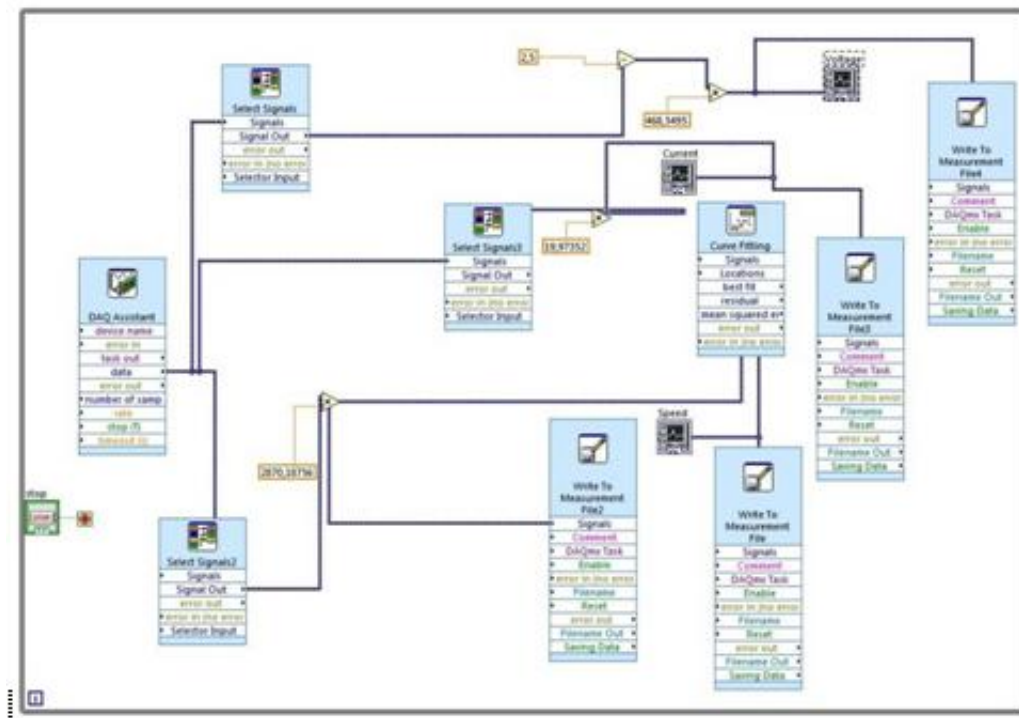


Рис. 3. Блок-диаграмма визуализации измерений

Полученному переходному процессу соответствует математическая модель ДПТНВ второго порядка (5) с преобразователем в виде апериодического звена первого порядка

$$W_{п1}(s) = \frac{K_{п1}}{T_{п1}s + 1} \quad (6)$$

и следующими значениями ее параметров: коэффициентом передачи – $K_{п1} = 22$; постоянной времени $T_{п1} = 0,00183$ с.

Прделанные исследования подтвердили работоспособность экспериментальной установки и применимость программного обеспечения для дальнейшей работы. Далее было проведено детальное исследование ДПТНВ с целью сравнительной оценки зависимостей угловой скорости, полученной экспериментально $n_{дпт.э1}(t)$ и в среде *MatLab* с использованием *Simulink* – модели объекта $n_{дпт.м1}(t)$.

Графики переходных процессов $n_{дпт.э1}(t)$ и $n_{дпт.м1}(t)$ представлены на рис. 4.

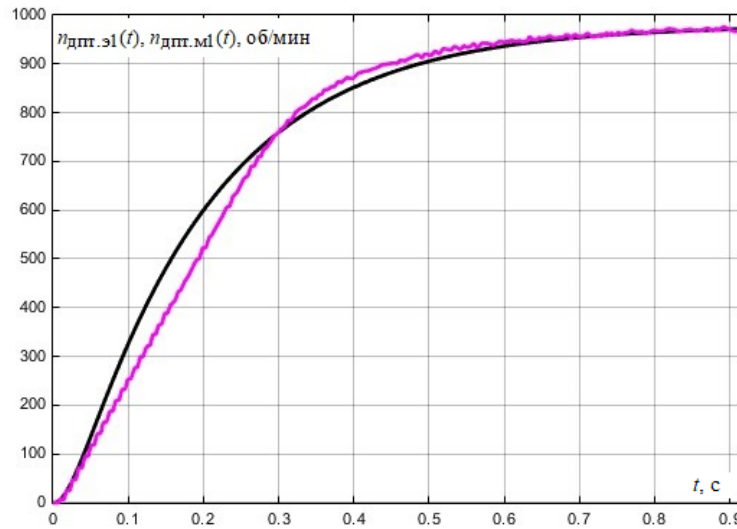


Рис. 4. Графики переходных процессов $n_{\text{дпт.э1}}(t)$ (сиреневый) и $n_{\text{дпт.м1}}(t)$ (черный)

Как видно из рис. 4, переходные процессы продолжаются в течение 0,92 с, что соответствует времени эксперимента. По окончании эксперимента значения угловых скоростей $n_{\text{дпт.э1}}^{\text{уст}}(t) = 972,6$ об/мин, $n_{\text{дпт.м1}}^{\text{уст}}(t) = 971,7$ об/мин, при этом относительная погрешность в установившемся режиме не превышает 0,1%.

Вторая экспериментальная установка (рис. 2) для исследования динамических процессов ДПТНВ имеет более компактную техническую реализацию. Отличительной особенностью установки является наличие микроконтроллера, в котором реализована рабочая программа обработки и регистрации информации о переходных процессах выходных координат электромеханического преобразователя.

Результаты экспериментального исследования процесса пуска двигателя постоянного тока типа *PiVT-6-25/3A* были зарегистрированы микроконтроллером *ATmega 328* с последующей обработкой на персональном компьютере в среде *Excel*. Таблица с полученными экспериментальными данными содержит 103 строки при эксперименте на том же временном интервале 0,92 с.

Полученный переходный процесс, также, как и графики на рис. 4, имеет аperiodический характер и описывается аналогичной математической моделью ДПТНВ второго порядка (5) с соответствующими значениями параметров (см. формулы (1) – (4)). Преобразователь описывается моделью вида

$$W_{\text{п2}}(s) = \frac{K_{\text{п2}}}{T_{\text{п2}}s + 1}, \quad (7)$$

где коэффициент передачи – $K_{\text{п2}} = 7$; постоянной времени $T_{\text{п2}} = 0,005$ с.

Графики экспериментального переходного процесса $n_{\text{дпт.э2}}(t)$ и переходного процесса *Simulink*-модели $n_{\text{дпт.м2}}(t)$ представлены на рис. 5.

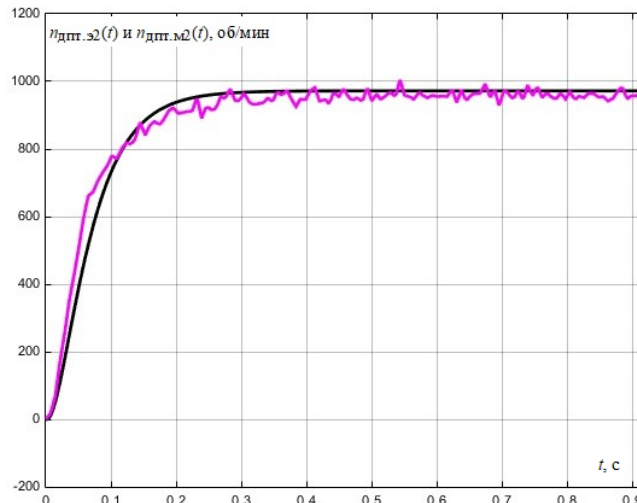


Рис. 5. Графики переходных процессов $n_{\text{дпт.э2}}(t)$ (сиреневый) и $n_{\text{дпт.м2}}(t)$ (черный)

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что установившиеся значения угловых скоростей составляют $n_{\text{ДПТ.Э}}^{\text{уст}}(t) = 969,5$ об/мин, $n_{\text{ДПТ.М}}^{\text{уст}}(t) = 972,2$ об/мин соответственно. При этом относительная погрешность в установившемся режиме не превышает 0,2%.

Экспериментальные зависимости $n_{\text{ДПТ.Э1}}(t)$ и $n_{\text{ДПТ.Э2}}(t)$ характеризуются флуктуациями измеряемой величины, вызванными электромагнитными процессами в тахогенераторе и погрешностями аналого-цифрового преобразования.

Кроме того, в переходном режиме на временных интервалах 0,03...0,3 с и 0,3...0,6 с (см. рис. 4) имеют место несовпадения экспериментальной кривой и кривой, полученной, с использованием *Simulink*-модели, что подтверждает наличие динамической погрешности. Подобные отклонения между экспериментальным и модельным графиками на рис. 5 находятся на временном интервале 0,01...0,12 с. Оценку динамической погрешности произведем на основе вычисления невязки (разности) ε между кривыми $n_{\text{ДПТ.Эi}}(t)$ и $n_{\text{ДПТ.Мi}}(t)$ с применением линейного интегрального критерия [статья]

$$Q(\varepsilon_i) = \int_0^{\infty} [n_{\text{ДПТ.Эi}}(t) - n_{\text{ДПТ.Мi}}(t)] dt. \quad (8)$$

На рис. 6 показаны графики невязки между кривыми, полученными на выходе *Simulink*-моделей и экспериментальными кривыми для двух экспериментов.

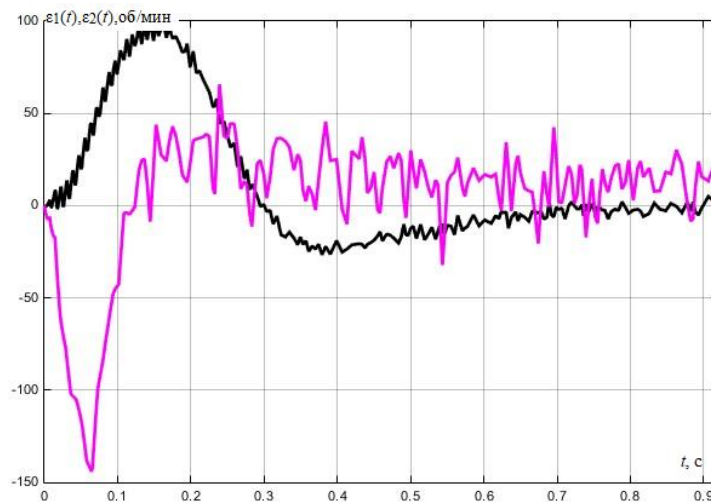


Рис.6. Графики невязки для двигателя 4ПБ112М2ГУХЛ4 $\varepsilon_1(t)$ (черный) и двигателя *PIVT-6-25/3A* $\varepsilon_2(t)$ (сиреневый)

Так, невязка $\varepsilon_1(t)$ характеризуется максимальным отклонением около 100 об/мин на 0,15 секунде, что соответствует наибольшей разнице между экспериментальными и модельными переходными процессами пуска ДПТНВ типа 4ПБ112М2ГУХЛ4. При этом максимальная амплитуда флуктуаций составляет 10 об/мин. По мере завершения переходного процесса величина невязки устанавливается около нулевого значения.

График невязки $\varepsilon_2(t)$ ДПТНВ типа *PIVT-6-25/3A* достигает экстремума –145 об/мин на 0,065 секунде, и затем колеблется около нулевого значения с максимальной амплитудой флуктуаций около 60 об/мин.

Из сравнения зависимостей $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ видно, что невязка $\varepsilon_1(t)$, полученная при проведении эксперимента по схеме на рис. 1, отличается как меньшей амплитудой флуктуаций, так и меньшим максимальным отклонением, что, при прочих равных условиях, говорит о большей точности экспериментальных данных и, соответственно, большей точности при реализации метода контроля функционирования электромеханических преобразователей, основанного на вычислении линейного интегрального критерия (8).

В этой связи графики $Q(\varepsilon_i) = f(t)$ позволяют не только оценить динамическую погрешность аппроксимации переходных процессов операторными моделями, но и сделать заключение о целесообразности применения одной из экспериментальных установок для реализации метода контроля функционирования электромеханических преобразователей. Зависимости линейного интегрального критерия $Q(\varepsilon_1)$, $Q(\varepsilon_2)$ от времени показаны на рис. 7.

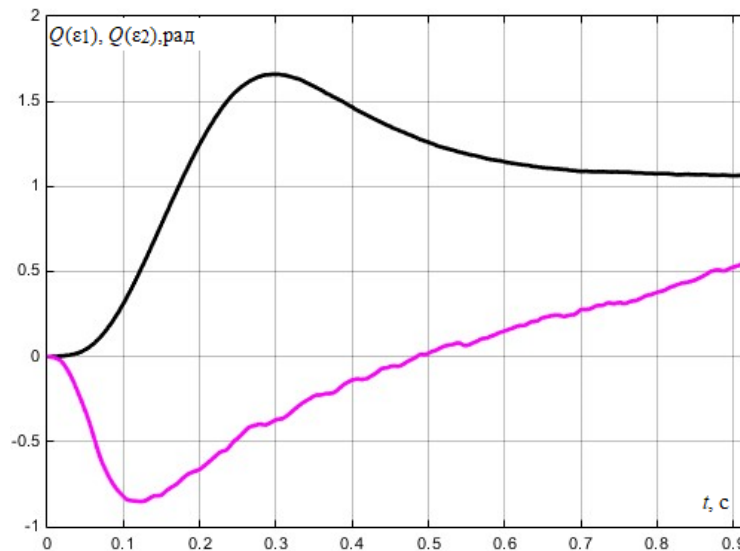


Рис. 7. Временные зависимости линейного интегрального критерия для двигателя 4ПБ112М2ГУХЛ4 $Q(\varepsilon_1)$ (черный) и двигателя PIVT-6-25/3A $\varepsilon_2(t)$ (сиреневый)

Из приведенных зависимостей видно, что по окончании переходного процесса установившиеся значения линейного интегрального критерия $Q(\varepsilon_1)$, $Q(\varepsilon_2)$ составляют 1,07 рад и 0,56 рад соответственно, что свидетельствует о меньшей динамической погрешности второго эксперимента. Таким образом, по соотношению компактности и простоты аппаратного обеспечения, а также точностных характеристик для реализации метода многопараметрического контроля ЭМП постоянного тока целесообразно использовать экспериментальную установку, изображенную в виде функциональной схемы на рис. 2. Далее в обозначениях индекс «2» также будет соответствовать данной экспериментальной установке.

В целях снижения флуктуаций полезного сигнала (см. рис. 5) целесообразно применить фильтрацию шумов, обеспечивающую повышение качества процесса регистрации выходных координат ЭМП и уменьшение уровня ошибок в измерительном канале. Операторное уравнение сглаживающего фильтра, синтезированного по критерию минимума интеграла невязки представлено выражением

$$W_f(s) = \frac{a_1 s + a_0}{c_2 s^2 + c_1 s + c_0} = \frac{0,06s + 1}{0,0005s^2 + 0,06s + 1}. \quad (9)$$

Применение в экспериментальной установке на рис. 2 микроконтроллера позволяет реализовать полученный алгоритм фильтрации в цифровой форме. Дискретную аппроксимацию фильтра (9) произведем с помощью билинейного преобразования [17, 18, 19] и при частоте дискретизации 622 Гц получим.

$$W_f(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{d_2 z^2 + d_1 z + d_0} = \frac{0,057z^2 + 0,0009z - 0,0561}{z^2 - 1,8849z + 0,8868}. \quad (10)$$

Выражению (10) соответствует схема непосредственного программирования, показанная на рис. 8.

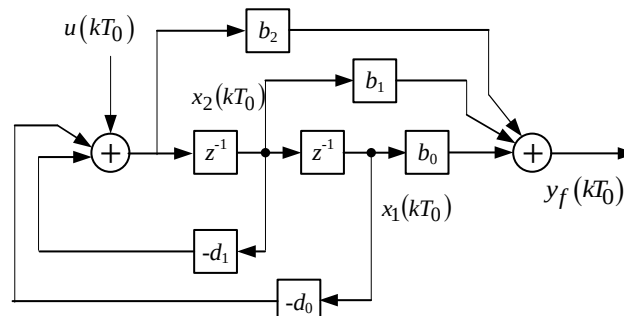


Рис. 8. Схема непосредственного программирования цифрового сглаживающего фильтра

На основе схемы на рис. 8 получены разностные уравнения цифрового фильтра в форме Коши

$$\begin{aligned}x_1[(k+1)T_0] &= x_2(kT_0); \\x_2[(k+1)T_0] &= -d_0x_1(kT_0) - d_1x_2(kT_0) + u(kT_0); \\y_f(kT_0) &= (b_0 - d_0b_2)x_1(kT_0) + (b_1 - d_1b_2)x_2(kT_0) + b_2u(kT_0),\end{aligned}\quad (11)$$

по которым составлена рабочая программа, реализующая алгоритмы обработки регистрируемой выходной координаты исследуемого ЭМП и фильтрации полученного сигнала.

Платформа *Arduino Nano* программируется с помощью соответствующего ПО *Arduino* без использования внешних программаторов за счет загрузчика *Nanow/Atmega 328* [20, 21]. Экспериментальные данные с тахогенератора обрабатываются 10-разрядным АЦП, встроенным в микроконтроллер, а результаты преобразования рассчитываются оператором *тари* формируют переменную, соответствующую скорости вращения ДПТ. Программа позволяет сохранить информацию о выходной координате ДПТ без учета фильтрации, а также отфильтрованные данные, которые передаются в персональный компьютер по протоколу связи *UART* с помощью команд *Serial.print()*, формируя массив значений времени и неотфильтрованного и отфильтрованного значений скорости на интервале эксперимента.

Результаты моделирования, характеризующие влияние синтезированного сглаживающего фильтра на переходный процесс выходной координаты ЭМП типа *PIVT-6-25/3A* показаны на рис. 9.

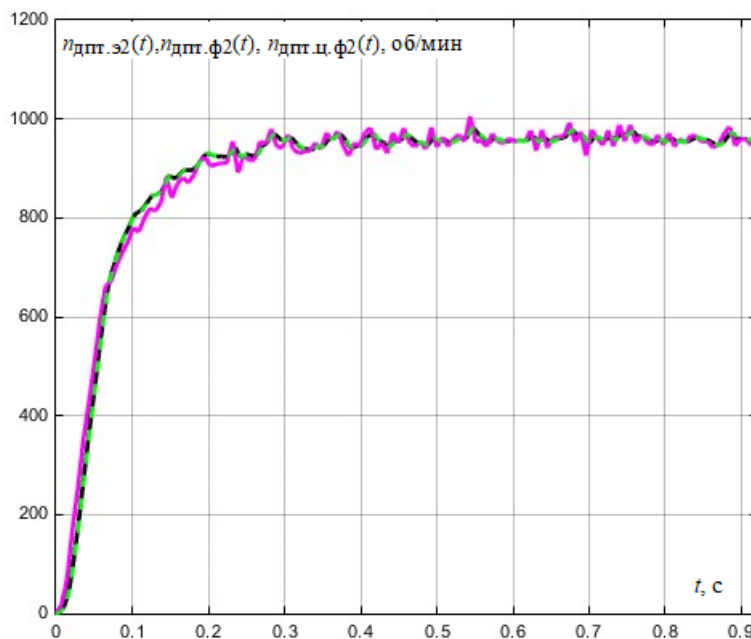


Рис. 9. Графики переходных процессов $n_{\text{дпт.э2}}(t)$ (сиреневый), $n_{\text{дпт.ф2}}(t)$ (черный), $n_{\text{дпт.ц.ф2}}(t)$ (зелёный)

Из полученных графиков (рис. 9) видно, что флуктуации скорости вращения ЭМП с учетом сглаживающих фильтров вида (9) и (10) находятся в допустимых пределах (не более 5%). Кроме того, погрешности дискретной аппроксимации аналоговой модели пренебрежимо малы.

Экспериментальное исследование переходного процесса пуска двигателя *PIVT-6-25/3A* отражено на рис. 10, 11.

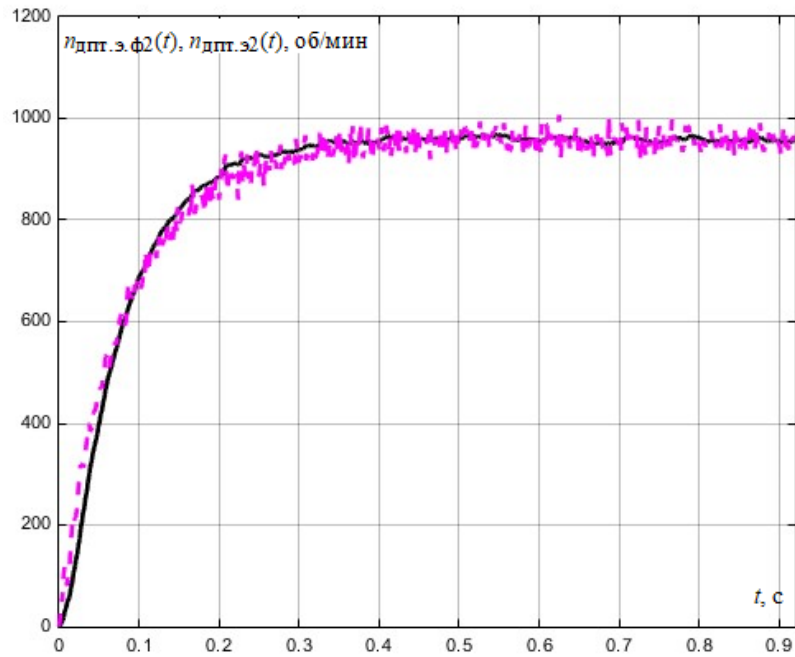


Рис. 10. Графики переходных процессов $n_{\text{дпт.э.ф2}}(t)$ с фильтром (черный), $n_{\text{дпт.э2}}(t)$ (сиреневый)

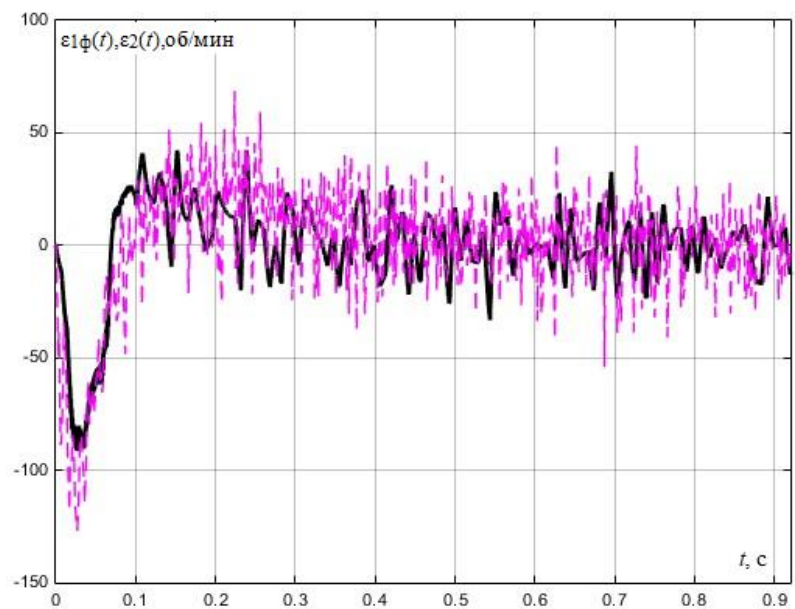


Рис. 11. Графики невязки для двигателя PIVT-6-25/3A со сглаживающим фильтром $\varepsilon_1(t)$ (черный) и без фильтра $\varepsilon_2(t)$ (сиреневый)

Следует отметить, что с целью повышения информативности эксперимент проводился с большей частотой дискретизации (622 Гц) по сравнению с результатами, представленными на рис. 5, 6 (частота дискретизации 103 Гц) и, соответственно, с большим количеством точек регистрируемой выходной координаты, как показано на рис. 10.

На рис. 11 изображены графики невязки, показывающие влияние сглаживающего цифрового фильтра на уменьшение флуктуаций регистрируемой координаты ЭМП, что проявляется в уменьшении высокочастотной составляющей шумов (около 4 кГц), а также снижении амплитуды выбросов практически в два раза.

Для подтверждения правильности проведенных расчетов также была получена временная зависимость линейного интегрального критерия, показанная на рис. 12.

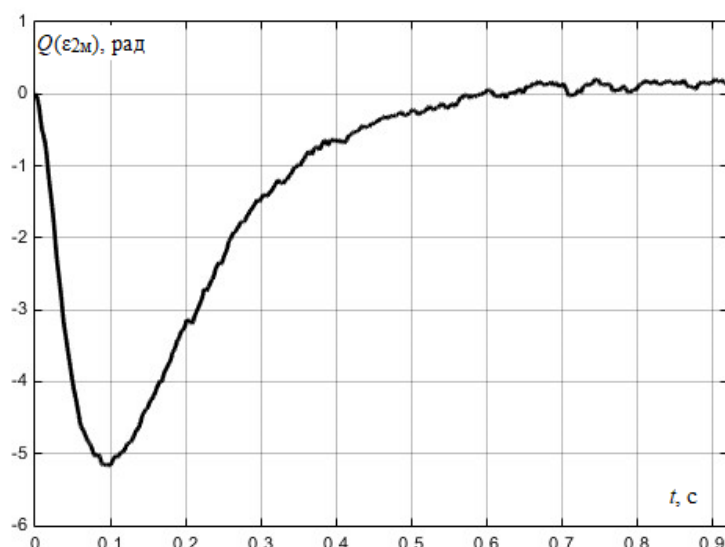


Рис. 12. Временные зависимости линейного интегрального критерия для двигателя PIVT-6-25/3A: модель $Q(\epsilon_{2м})$ (черный), эксперимент $Q(\epsilon_{2э})$ (сиреневый)

Из приведенного графика следует, что отклонение экспериментальной кривой $Q(\epsilon_{2э})$ достигает максимального значения около 5 рад на 0,1 с, а к окончанию переходного процесса не превышает 0,13 рад, что подтверждает правильность аналитических расчетов.

Выводы

Проведенные исследования с двигателями постоянного тока типа 4ПБ112М2ГУХЛ4 и PIVT-6-25/3A на соответствующих экспериментальных установках (рис. 1 и рис. 2), показали преимущества второй установки, которая является более компактной и экономически оправданной с точки зрения аппаратного обеспечения, а программное обеспечение микроконтроллера *Arduino Nano* не требует специальной лицензии и отличается относительной простотой. Первая установка, благодаря применению сложного аппаратно-программного обеспечения, обеспечивает высокую точность процесса исследования, что выражается в сравнительно низком уровне шумов и флуктуаций регистрируемой координаты ЭМП. Первоначальные исследования второй установки показали, что величина линейного интегрального критерия, необходимая для реализации метода многопараметрического контроля функционирования ЭМП постоянного тока, сглаживается инерционностями элементов экспериментальной установки. Тем не менее, в целях снижения погрешности результатов исследования был применен цифровой фильтр, синтезированный по критерию минимума интеграла невязки, что обеспечило заданную пятипроцентную ошибку, вызванную влиянием шумов. Таким образом, применение сравнительно простого микроконтроллера *Arduino Nano*, выполняющего функции аналого-цифрового преобразования, регистрации и фильтрации измерительной информации позволяет использовать разработанную экспериментальную установку для анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока с нестабильными параметрами на этапах проектирования и в процессе эксплуатации.

Литература

1. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Городнов А.Г. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(4):113-122.
2. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60-67.
3. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., et al. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019). V. 124.
4. Саушев А.В., Широков Н.В. Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2016. №2 (36). С. 143-156.
5. Frisk E., Krysander M., and D. Jung. A toolbox for analysis and design of model based diagnosis systems for large scale models. IFAC-PapersOnLine. 2017. V. 50. №1. pp. 3287–3293.

6. Delgado-Arredondo P.A., Morinigo-Sotelo D, et al. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. V. 83, pp. 568–589.
7. Jardine A.K., Lin D and Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*. 2006. V. 20. №. 7, pp. 1483–1510.
8. Dmitriev B.F., Cherevko A.I., Gavrilov D.A. Universal MatLab-Simulink model of a generalized electrical machine. *Russian Electrical Engineering*. 2005. Vol. 76. № 7. P. 1-8.
9. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Кучеров В.А., и др. Применение алгоритма натурно-модельных испытаний для диагностики электротехнических систем // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1-2. С. 98.
10. Седова И.Ю., Юдина О.И. Исследование параметров математической модели для расчета добавочных потерь в двигателе постоянного тока при импульсном питании. Сев.-Кавк. гос. техн. ун-т. Ставрополь, 2007.
11. Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. Экспериментальное исследование синхронного двигателя с постоянными магнитами // *Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов «Энергия-2015» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ*. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. 118 с.
12. Матвеева О.Л., Селиверов Д. И. Современные электродвигатели для стрелочных приводов // *Актуальные вопросы технических наук: материалы 2 Междунар. науч. конф. г. Пермь, февраль 2013 г. Пермь: Меркурий*, 2013. С. 102-104.
13. Smedley Trevor J., Cox Philip T. Visual Languages for the Design and Development of Structured Objects // *Journal of Visual Languages and Computing*. VLC. 1997. Vol. 8, № 1. pp. 5784.
14. Meurice L., Nagy C., Cleve A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. In: Nurcan, S. Soffer, P. Bajes, M. Eder, J. (eds.) *CAiSE 2016. LNCS*. 2016. V. 9694. pp. 491-506. Springer, Cham.
15. Бориско С.Н., Кислов О.В., Кобзарь А.А., и др. Анализ результатов обработки информационных сигналов с частотой модуляции, близкой к частоте Найквиста // *Двойные технологии*. ЗАО "Передовые специальные технологии и материалы". 2019. №1. С.53–56.
16. Бильфельд Н.В. Программное использование функций Excel // *Новый университет. Серия: Технические науки*. 2013. № 3. С. 3-7.
17. Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д. Развитие метода билинейного преобразования для синтеза цифровых фильтров. *Материалы МНТК «INTERMATIC-2017» Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 20–24 ноября 2017 г. Москва. В сборнике: Информационные технологии и телекоммуникации. С. 1183-1185.
18. Kwaha B.J., Kolawole E.A., Batu A.M. The design and implementation of a digital infinite impulse response (IIR) lowpass Butterworth filter – A comparison of Matlab and Bilinear transformation methods // *Indian Journal of Science and Technology*. 2011. V. 4. № 4. pp. 451-455.
19. Зиятдинов С.И., Аграновский А.В., Осипов Л.А. Синтез комплексного фильтра с заданной передаточной функцией // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 7. С. 542-546.
20. Омельченко Е.Я., Танич В.О., Маклаков А.С., Карякина Е.А. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino. Магнитогорск: «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. С.28-33.
21. Milan Matijevic, and Vladimir Cvjetkovic. Overview of architectures with Arduino boards as building blocks for data acquisition and control systems in Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2016 International Conference on 2016. pp. 56-63.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Мухаметшин Азат Ильдусович – ассистент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Чичков Павел Владимирович – ведущий инженер отдела автоматизации, АО «Казанский Гипронефтеавиапром».

References

1. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):113-122.

2. Malev NA, Pogoditsky OV, Lyubarchuk FN. Analysis of changes in the parameters of an asynchronous motor by a linear integral criterion using a reference model. *Bulletin of KSPEU*. 2019;1:60-67.
3. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*. V. 124.
4. Saushev AV, Shirokov NV. Diagnosis of the state of electrical systems in the space of parameters of their elements. *Bulletin of the SUSRF after admiral S.O. Makarov*. 2016;2 (36):143-156.
5. Frisk E, Krysander M and. Jung D. *A toolbox for analysis and design of model based diagnosis systems for large scale model*. IFAC-PapersOnLine. 2017;50(1):3287–3293.
6. Delgado-Arredondo PA, Morinigo-Sotelo D, Osornio-Rios RA. J. G. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2017;83:568–589.
7. Jardine AK, Lin D, and Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*. 2006;20,(7):1483–1510.
8. Dmitriev BF, Cherevko AI, Gavrilov DA. Universal MatLab-Simulink model of a generalized electrical machine. *Russian Electrical Engineering*. 2005;76(7):1-8.
9. Lankin AM, Lankin MV, Kuchero V A, et al. Application of the algorithm nature-model tests for the diagnosis of electrical systems. *Modern problems of science and education*. 2015;1-2:98.
10. Study of the parameters of the mathematical model for calculating the additional losses in a DC motor with pulsed power / Sedova I.Yu., Yudina O.I. ; Sev.-Kavk. state tech. un-t – Stavropol, 2007.
11. Shmarin YaA, Kodkin VL. Experimental study of synchronous motors with permanent magnets. - *BULLETIN of the CIGRE Russian National Committee*. Issue N.7. Materials of the Youth Section of the RNC CIGRE: a collection of competitive reports “Energy-2015” in the field of electricity and electrical engineering in the areas of CIGRE research. Ivanovo, 2015. 118 p.
12. Matveeva OL, Seliverov D.I. *Modern electric motors for switch drives*. Actual problems of technical sciences: materials of the 2th Intern. scientific conf. (Perm, February 2013). Perm: Mercury, 2013. pp. 102–104.
13. Smedley Trevor J. Cox Philip T. Visual Languages for the Design and Development of Structured Objects. *Journal of Visual Languages and Computing*. VLC. 1997;8(1):57–84.
14. Meurice L. Nagy C. Cleve A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. CAiSE 2016. LNCS. 2016;9694:491-506. Springer, Cham.
15. Borisko SN, Kislov OV, Kobzar AA, et al. Results analysis of informative signals with a modulation frequency close to the Nyquist frequency processing Dual Technologies. *CJSC Advanced Special Technologies and Materials*. 2019;1:53–56.
16. Bilfeld N.V. Programming application of Excel functions. *New University. Series: Engineering*. 2013;3:3–7.
17. Kreindelin VB, Grigoryeva E.D. *Development of the bilinear conversion method for the synthesis of digital filters*. Materials of ISTC “INTERMATIC-2017” Fundamental Problems of Radioelectronic Instrument Making. November 20–24, 2017 Moscow. In the collection: Information Technologies and Telecommunications. pp. 1183-1185.
18. Kwaha BJ, Kolawole EA., Batu A.M. The design and implementation of a digital infinite impulse response (IIR) lowpass Butterworth filter. A comparison of Matlab and Bilinear transformation methods *Indian Journal of Science and Technology*. 2011; 4(4):451–455.
19. Ziatdinov SI, Agranovsky AV, Osipov LA. Synthesis of a complex filter with specified transfer function. *Instrumentation*. 2016;59(7):542–546.
20. Omelchenko EYa, Tanich VO, Maklakov AS, et al. *A brief overview and prospects for the use of the Arduino microprocessor platform*. Magnitogorsk: "Magnitogorsk State Technical University" Electrotechnical systems and complexes. 2017. pp. 28–33.
21. Milan Matijevic, and Vladamir Cvjetkovic. *Overview of architectures with Arduino boards as building blocks for data acquisition and control systems*. Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), International Conference on, 2016. pp. 56-63.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: maleev@mail.ru. **Azat I. Mukhametshin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Pavel V. Chichkov – JSC «Kazan Giproniaviaprom», Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

27 марта 2020г.

Сдано в набор 01.10.2020
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 12,6
Заказ №
Дата выхода в свет

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная