

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,
«Серия Г: Технические науки»
основана в 2018 году*

Серия Г:
Технические
науки

1/2024

Редакционная коллегия журнала
«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов.**

Зам. главного редактора – канд. техн. наук **И.А. Третьяков.**

Ответственный секретарь – канд. техн. наук **Е.Д. Пометун.**

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин;** д-р техн. наук, проф. **Л.В. Алексейчик;** канд. физ.-мат. наук, с.н.с. **П.В. Асланов;** канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башева;** д-р техн. наук, доц. **И.А. Бершадский;** д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков;** д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский;** д-р техн. наук, доц. **К.А. Вытовтов;** д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин;** канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин;** канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко;** канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская;** д-р техн. наук, доц. **А.В. Звягинцева;** д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори;** д-р техн. наук, доц. **В.В. Карнаух;** канд. техн. наук, с.н.с. **А.А. Курушин;** канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский;** д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина;** канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён;** д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров;** д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк;** академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов;** канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко;** д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых;** д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов;** д-р техн. наук, доц. **Д.В. Шевцов;** канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова.**

The Editorial Board of the journal
«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov.**

The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech. **I.A. Tretiakov.**

Assistant Editor – Cand. of tech. **E.D. Pometun.**

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **G.V. Averin;** Dr. of tech., prof. **L.V. Alekseichik;** Cand. of phys. and math., s. researcher **P.V. Aslanov;** Cand. of tech., doc. **T.S. Bashevaia;** Dr. of tech., doc. **I.A. Bershadskii;** Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov;** Dr. of tech., prof. **S.V. Borshevskii;** Dr. of tech., doc. **K.A. Vytovtov;** Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin;** Cand. of tech., doc. **S.V. Gridin;** Cand. of tech., doc. **T.V. Ermolenko;** Cand. of tech., doc. **T.V. Zavadskaia;** Dr. of tech., doc. **A.V. Zviagintseva;** Dr. of tech., doc. **S.A. Zori;** Dr. of tech., doc. **V.V. Karnaukh;** Cand. of tech., s. researcher **A.A. Kurushin;** Cand. of tech., doc. **I.A. Molokovskii;** Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina;** Cand. of tech., doc. **V.V. Paslen;** Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov;** Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk;** RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov;** Cand. of phys. and math., doc. **V.I. Timchenko;** Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh;** Dr. of tech., prof. **M.N. Shevtsov;** Dr. of tech., doc. **D.V. Shevtsov;** Cand. of tech., doc. **O.G. Shelekhova.**

Адрес редакции: 283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

Тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

С 12.02.2024 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) по следующим научным специальностям и соответствующей им отрасли (технические науки):

- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры,
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы,
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения,
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций,
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика,
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы,
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами,
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы,
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника,
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы,
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №3 от 29.03.2024 г.*

**Вестник
Донецкого
национального
университета**

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён включению
журнала в Перечень ВАК
Российской Федерации

№ 1/2024

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительное слово 3

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Игнатъев Н.О., Курушин А.А. Моделирование антенны на корпусе самолета 4

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Елисеев В.О., Бондаренко В.И. Предсказание успешности прохождения образовательных онлайн-курсов с помощью классификатора Random Forest 16

Перевышин В.Г., Ковальчик Р.В. Повышение точности работы нейронных сетей по распознаванию рукописных символов за счет предварительной подготовки данных 24

Mukhamedieva D.K., Mukhamadieva K.B., Vozorboev ZH.U. Image filtering method for recognizing the desired objects 32

Третьяков И.А., Данилов В.В., Ступак В.А. Применение оптических методов обработки информации в АСНИ радиосигналов 42

Мисакордзян А.О., Нестругина Е.С. Обнаружение и распознавание фруктов на основе глубокого машинного обучения для автоматического сбора урожая 50

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Введенская М.И., Варакута В.В., Гридин С.В. Интенсификация конструирования электродвигателей в среде САПР КОМПАС 59

Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Использование комбинированных устройств глубокого охлаждения дымовых газов на водогрейных котлах системы ЖКХ 69

Базыкин Д.А., Дахин С.В., Бараков А.В. Численное моделирование теплообмена и вариантов его интенсификации в профилированных каналах термоэлектрической генераторной установки 82

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Хуррамова Н.М., Хуррамов М.Г., Джураева Н.Б. Исследование энерго-ресурсосберегающего способа обогащения кислородом недостаточно очищенных сточных вод 93

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

Правила для авторов 101

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the journal
inclusion in List of HAC
Russian Federation

Series G: Technical sciences

№ 1/2024

CONTENTS

Opening remark 3

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

Ignatev N.O., Kurushin A.A. Simulation antenna array on airplane 4

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

Eliseev V.O., Bondarenko V.I. Predicting the success of online educational courses using the Random Forest classifier 16

Perevyshin V.G., Kovalchik R.V. Improvement of accuracy of work of neural networks through the use preliminary preparation of data 24

Mukhamedieva D.K., Mukhamadieva K.B., Bozorboev ZH.U. Image filtering method for recognizing the desired objects 32

Tretiakov I.A., Danilov V.V., Stupak V.A. Application of optical information processing methods in ASRS of radio signals 42

Misakordziian A.O., Nestrugina E.S. Fruit detection and recognition based on deep machine learning for automatic harvesting 50

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

Vvedenskaia M.I., Varakuta V.V., Gridin S.V. Intensification of the design of electric motors in the COMPASS CAD environment 59

Biriukov A.B., Lebedev A.N., Kaminskii K.D. The use of combined deep flue gas cooling devices on hot water boilers of the housing and communal services system 69

Bazykin D.A., Dakhin S.V., Barakov A.V. Numerical simulation of heat transfer and options for its intensification in profiled channels of thermoelectric generator installation 82

TECHNOSPHERE SAFETY

KHurramova N.M., KHurramov M.G., Dzhuraeva N.B. Investigation of an energy-resource-saving method for oxygen enrichment of insufficiently treated wastewater 93

INFORMATION SECTION

Rules for authors 101

Уважаемые коллеги!

С гордостью сообщаем Вам, что редколлегией достигнута поставленная в 2023 году цель и выполнена приоритетная задача по полноценному включению нашего Журнала в Перечень ВАК Российской Федерации.

Так, согласно рекомендациям президиума Высшей аттестационной комиссии распоряжением Минобрнауки России от 12 февраля 2024 №56-р издание «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» включено в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующей им отрасли (технические науки):

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры,

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы,

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения,

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций,

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика,

2.3.2. Вычислительные системы и их элементы,

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами,

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,

2.3.8. Информатика и информационные процессы,

2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника,

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы,

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Таким образом, все научные статьи, опубликованные в журнале, начиная с данного Юбилейного 25-го номера, могут быть учтены авторам при соискании ученых степеней и ученых званий. Надеемся на привлечение новых авторов, а также на сохранение и расширение сотрудничества с нашими постоянными авторами.

Следует также отметить, что журнал стал одним из первых в Донецкой Народной Республике, которые включены в Перечень ВАК Российской Федерации.

Главный редактор



В.В. Данилов

Э Л Е К Т Р О Н И К А , Ф О Т О Н И К А , П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е И С В Я З Ъ

EDN FJGJVO
УДК 621.354.76

DOI 10.5281/zenodo.10974545

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ НА КОРПУСЕ САМОЛЕТА

© 2024 *Игнатъев Н.О., Курушин А.А.*

Используя асимптотические методы расчета поля в пространстве (методы геометрической и физической оптики), моделируются излучающие системы на корпусе самолета. Для расчета диаграммы сканирования фазированной антенной решетки (ФАР) используется программа «Savant», входящая в комплекс HFSS ANSYS. Это позволяет выявить появление ложных целей и слепых зон ФАР, смонтированной на самолете. Расчеты эффективной площади рассеяния (моностатического и бистатического RCS) показывают скрытность самолета при облучении его системами ПВО.

Ключевые слова: HFSS ANSYS, Savant, методы геометрической и физической оптики, фазированная антенная решетка, диаграмма сканирования, ложные цели, слепые зоны, дистанционно пилотируемый летательный аппарат ДПЛА.

Введение. Расчет диаграммы направленности (ДН) антенны, установленной на корпусе самолета, можно выполнить, используя асимптотические методы расчета физической и геометрической оптики [1-4]. С помощью ассистента «Savant» программы HFSS ANSYS [1] возможно рассчитать характеристики (диаграмму сканирования, слепые углы, ложные цели) антенной решетки, стоящей на самолете. Метод SBR (Shooting and Bouncing Rays) используемый в Savant, позволяет решать задачи рассеяния для антенн, расположенных на объектах, составляющих тысячи длин волн т.е. тех задач, решение которых проблематично, используя метод конечных элементов [2]. Чтобы рассчитать диаграмму направленности ФАР, стоящей в выбранной точке самолета, в этом методе рассчитываются все лучи, идущие от антенны к рассеивающей геометрии [3], таким образом, определяя, какие поверхности непосредственно освещены.

Запущенные геометрические лучи, возбужденные антенной, представляют собой расходящиеся объемно-лучевые трубки, которые "окрашивают" токи на поверхности платформы в соответствии с граничными условиями. Эти токи в свою очередь излучают поля в дальнюю зону, а также формируют ближнее поле в точках наблюдения, или воздействуют на антенну R_x для создания вклада поля рассеяния. Далее из точек, в которых лучи падают на поверхности, формируется набор отраженных лучей (рис. 1).

Алгоритм SBR, реализованный в Savant, интегрирует возбуждение токов от всех прочерченных лучей на основании выражения [1]:

$$\bar{E}_S(\bar{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S'} dS' \left[(\hat{n}' \cdot \bar{E}) \nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} + (\hat{n}' \times \bar{E}) \times \nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} - j\omega\mu_0 (\hat{n}' \times \bar{H}) \frac{e^{-jkR}}{R} \right], \quad (1)$$

где \bar{E}_s - рассеянное электрическое поле в точке наблюдения, S' - область действия лучей в точках падения на поверхность, E и H - суммарные электрические и магнитные поля на поверхности при воздействии падающего и отраженного лучей, \hat{n}' - нормаль к поверхности, \bar{r} - положение вектора направления луча к точке наблюдения, R - расстояние от источника до точки наблюдения, а μ_0 - магнитная проницаемость в свободном пространстве.

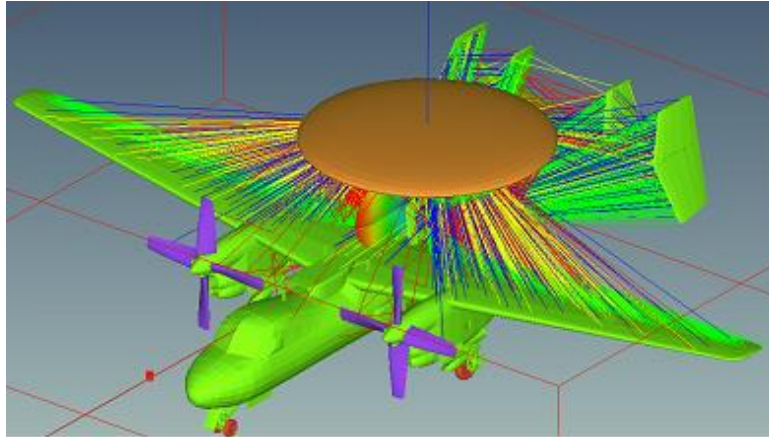


Рис. 1. Ход лучей у самолета под действием отражения от корпуса

Выражение (1) используется в Savant для вычисления вклада рассеянного поля в любой точке наблюдения. Для углов наблюдения в дальнем поле, функция Грина $\frac{e^{-jkR}}{R}$ в ур. (1) заменяется фазовым коэффициентом, зависящим от выбранной точки отсчета фазы.

Если в анализируемой структуре имеется приемная антенна R_x , то комплексная амплитуда приемного сигнала равна:

$$b = \frac{j\lambda}{\sqrt{4\pi\eta_0}} \bar{E} \cdot \bar{d}_{R_x}$$

где d_{R_x} - вектор направленности дальнего поля антенны R_x , E - падающее или рассеянное электрическое поле в точке антенны R_x , η_0 - импеданс свободного пространства.

Рассеянное поле вычисляется отдельно на каждом сегменте антенны R_x , а векторные продукты тока затем когерентно суммируются. Источники тока представляют антенну как излучатель, а также они служат для характеристики антенны R_x в качестве приемника в соответствии с теоремой взаимности, и этот факт используется для определения комплексной амплитуды приемного сигнала для антенны R_x . Таким образом, Savant может решать задачи электромагнитной совместимости.

Расчет ДН антенны, установленной на корпусе самолета. Важной задачей установки антенн на самолет является функционирование радиолокационной и связной аппаратуры. Это необходимо для своевременной передачи информации и обнаружения потенциального противника. Для знания точных характеристик антенны, необходимо исследовать влияние корпуса самолета (рис. 2) на характеристики ДН антенны, установленной на нём. Самолет представляет собой сложную фигуру, размерами много больше длины волны.

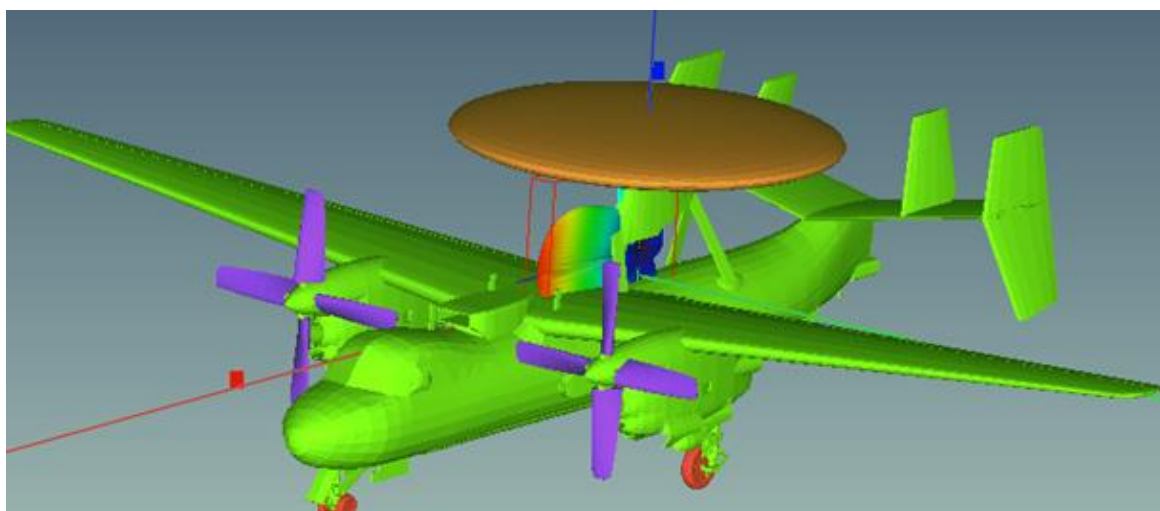


Рис. 2. Модель самолета в программе SAVANT

Самолет на рис. 2 состоит из главного корпуса; двигателя с винтом, кабины, каждый из своего материала. Модель самолета, созданная в программах Auto Cad, записывается в файле с расширением *.facet и состоит из площадок (фасок), покрывающих поверхность самолета.

Для расчета и получения ДН импортируемой антенны с учетом отражения от корпуса, задается сектор углов, в направлениях по которым рассчитывается поле в дальней зоне. Если выполняется анализ ДН ФАР работающей в режиме передачи, то устанавливаем возбуждение антенной T_x (рис. 2). При решении задачи электромагнитной совместимости множества антенн на самолете, в Savant выбираются каналы связи между отдельными антенными системами. В методологию расчета входят задание плотности лучей, максимального числа учитываемых отражений от поверхностей, а также учет ползущих волн (CreepingWaves).

В результате расчета в программе Savant, в окне модели получаем трехмерную ДН (рис. 3), значительно отличающую от ДН ФАР без учета корпуса самолета.

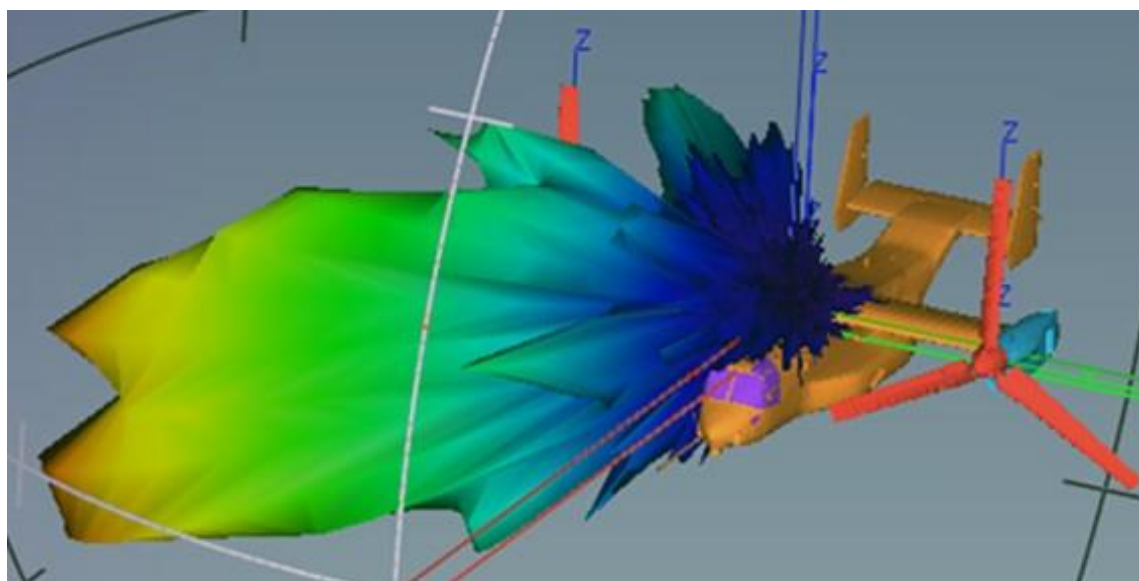


Рис. 3. Трехмерная диаграмма направленности ФАР на самолете

Этот трехмерный график можно перевести на две плоскости: прямоугольную систему координат и полярную систему координат (рис. 4).

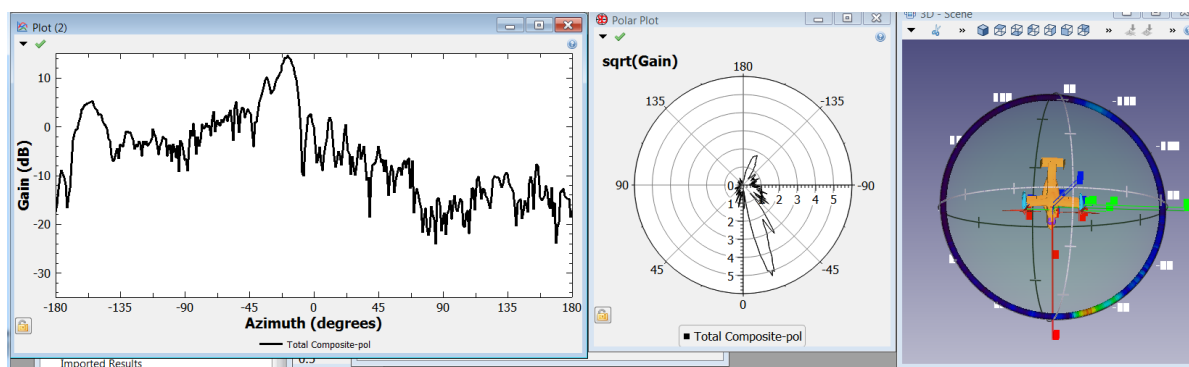


Рис. 4. Представление ДН на прямоугольной и в полярной системе координат

На рис. 4 показывается сечение ДН в азимутальной плоскости. Сечения ДН в меридиональной плоскости (по углу места) показывается на рис. 5. Рассчитанные сечения ДН в меридиональной плоскости (угол места) показывают, как антенная решетка излучает в вертикальном сечении.

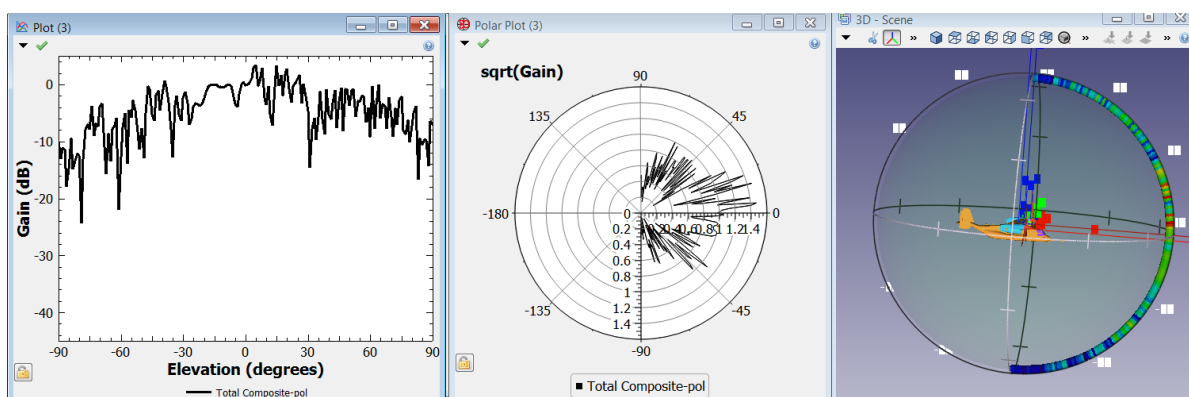


Рис. 5. Характеристики ДН в меридиональной плоскости

Для верификации результатов расчета, возможно удаление корпуса самолета и получения ДН антенной решеткой в свободном пространстве, которая должна совпадать с ранее рассчитанной ДН антенны (рис. 6).

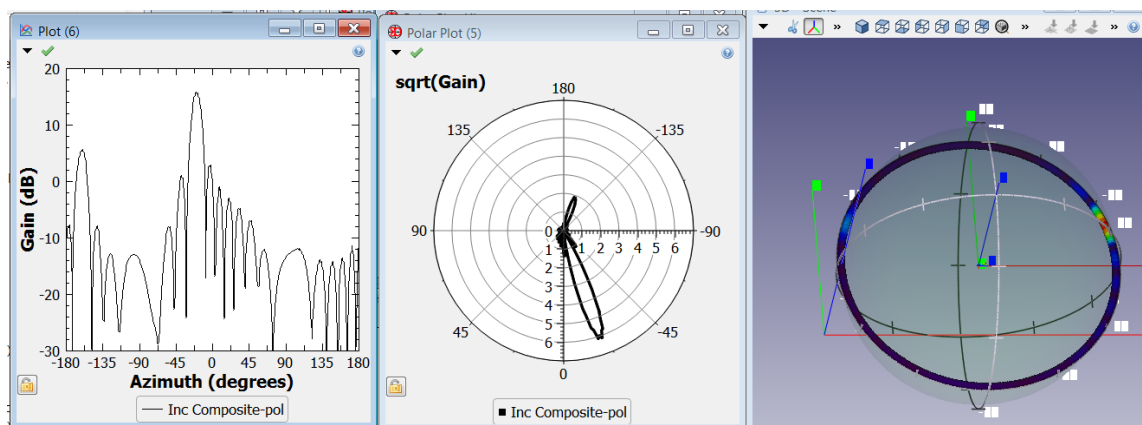


Рис. 6. Характеристики ФАР без самолета в азимутальной плоскости

Главной целью расчета фазированных антенных решеток (ФАР) является расчет её диаграммы сканирования, показывающей, как изменяется положение главного и боковых лепестков при сканировании в пространстве. ФАР может моделироваться в единой конструкции, а также используя условие периодичности. Сравнения этих случаев позволяет численно оценить вклад отдельных элементов антенной решетки, и учесть краевые эффекты, т.е. оценить вклад элементов антенной решетки, расположенных на краю (рис. 7).

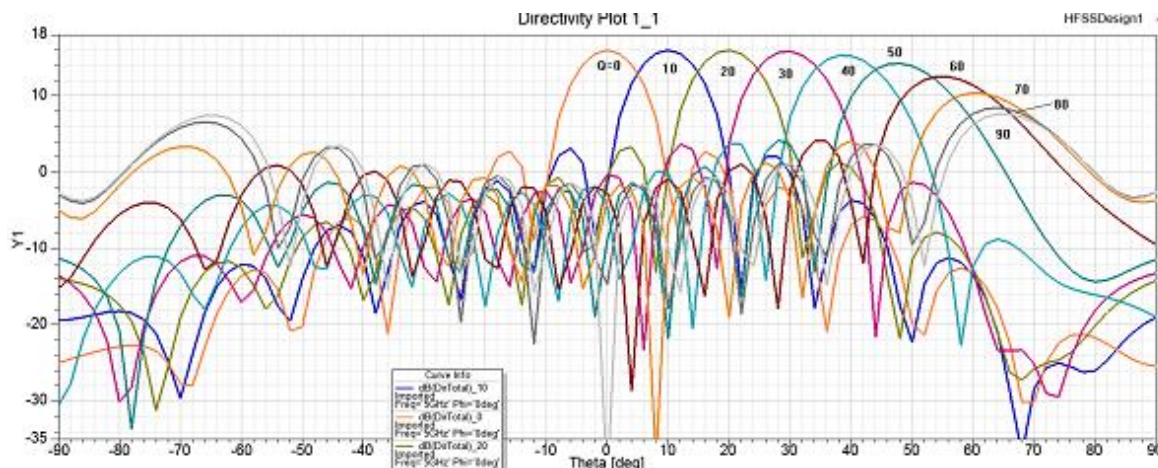


Рис. 7. Диаграмма сканирования сечения ДН антенной решетки из 10 элементов при $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 90^\circ$

В результате анализа работы ФАР при различных фазах возбуждения элементов получаем диаграммы сканирования, которые показывают зависимости положения главного лепестка и боковых лепестков. При электронном сканировании ФАР. Анализ диаграммы сканирования позволяет получить данные о слепых углах, слепых зонах и ложных целях, которые могут возникнуть на экране радиолокатора, а также оптимизировать размеры ФАР так, чтобы исключить эти недостатки, влияющие на работу радиосистемы.

Сканирование главного луча антенной решетки выполняется, изменяя разность фаз между соседними элементами антенной решетки [2]. Одновременно с направлением главного лепестка, меняется положение и уровни боковых лепестков. Зависимости характеристик ДН (ширина угла, максимальный КНД, уровень боковых лепестков) от направления главного луча – это и есть диаграммы сканирования. Рассмотрим эквидистантную ФАР [2]. Разность фаз возбуждения соседних элементов ФАР зависит от расстояния между ними d и от длины волны λ . Угол сканирования θ связан с углом Φ следующим образом:

$$\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta. \quad (2)$$

При часто встречающемся выборе $d = \lambda/2$ получаем:

$$\Phi = 180 \cdot \sin \theta.$$

Для антенны, состоящей из 10 линейно расположенных антенн Вивальди диаграмма сканирования приведена на рис. 7. Она показывает, как меняется сечение ДН при сканировании главного луча в пространстве. На рис. 8 показывается ближнее поле в сечении антенной решетки, возбуждаемое при разности фаз $\Phi=45^\circ$, чтобы получить направление $\theta = 15^\circ$.

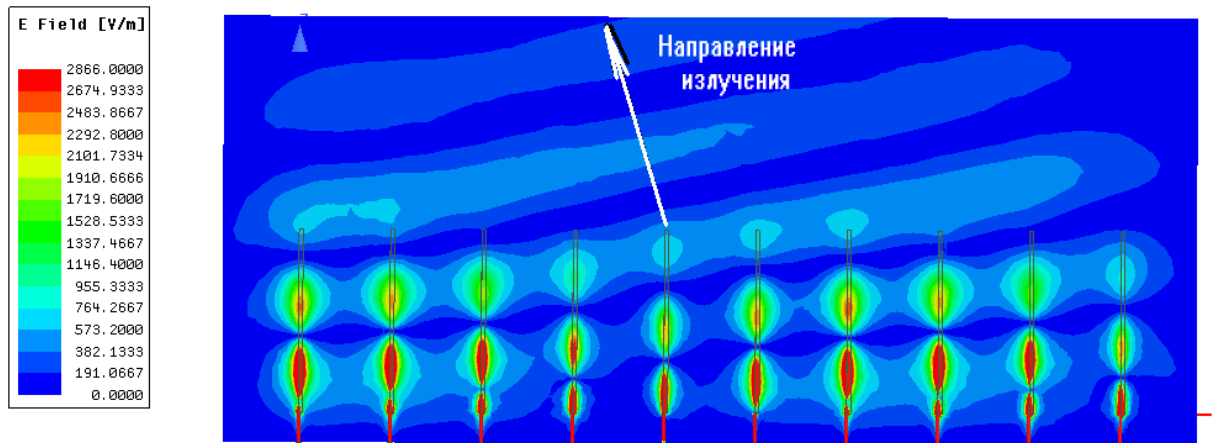


Рис. 8. Ближнее поле в сечении антенной решетки из 10 элементов

Если элементов антенной решетки 100 и более, и краевых элементов ФАР значительно меньше, чем внутренних элементов, то в этом случае удобно применить периодические граничные условия Master-Slave, и моделировать только один элемент ФАР, и использовать, таким образом, эквидистантное построение решетки. Канал Флоке, охваченный периодическими граничными условиями, и имеющий два порта Флоке, выполняет такую же функцию.

Диаграмма направленности антенной решетки $E_{array}(\phi, \theta)$ рассчитывается как произведение диаграммы направленности элемента антенной решетки $E_{element}(\phi, \theta)$ и множителя направленности решетки, состоящей из N идентичных излучателей, по формуле:

$$E_{array}(\phi, \theta) = AF(\phi, \theta)E_{element}(\phi, \theta), \quad (3)$$

где $AF(\phi, \theta)$ множитель направленности антенной решетки и рассчитывается по формуле

$$AF(\phi, \theta) = \sum_{n=1}^N W_n e^{jk r_n \hat{r}}, \quad (4)$$

в которой:

(ϕ, θ) - переменные сферической системы координат (углы);

W_n - комплексный весовой коэффициент (амплитуда поля возбуждения), относящийся к элементу n ;

j - мнимая единица;

$k = 2\pi / \lambda$ - постоянная распространения, λ - длина волны;

r_n - вектор расположения n -го элемента, с координатами $\langle x_n, y_n, z_n \rangle$;

\hat{r} - единичный вектор (вектор направления) с координатами $\langle \sin \theta_0 \cos \phi_0, \sin \theta_0 \sin \phi_0, \cos \theta_0 \rangle$.

Комплексные коэффициенты W_n в (4) могут быть записаны в терминах амплитуды поля возбуждения A_n и фазы возбуждения элементов ФАР ψ_n как:

$$W_n = A_n e^{j\psi_n}.$$

Чтобы установить отклонение луча в заданное направление (φ_0, θ_0) , фазы возбуждения элементов устанавливаются как:

$$\psi_n = -kr_n \cdot \hat{r}_0.$$

Если элементы ФАР установлены в ряд вдоль оси x , то координаты единичного вектора $\hat{r}_0 = \langle \sin \theta_0 \cos \phi_0, \sin \theta_0 \sin \phi_0, \cos \theta_0 \rangle$ используются для получения выражения (2), а угол ψ становится равным Φ . Изменение угла сканирования (ϕ_0, θ_0) приводит к изменению величины AF в (3) в каждом направлении главного луча ФАР.

Для решетки с регулярной структурой, фаза угла сканирования может быть записана также в терминах разницы сдвига фаз сигнала возбуждения Φ между соседними антенными элементами. Величина Φ либо устанавливается равной разности фаз между границами Master и Slave, задаваемого пользователем, либо рассчитываемого по (3) (рис. 9).

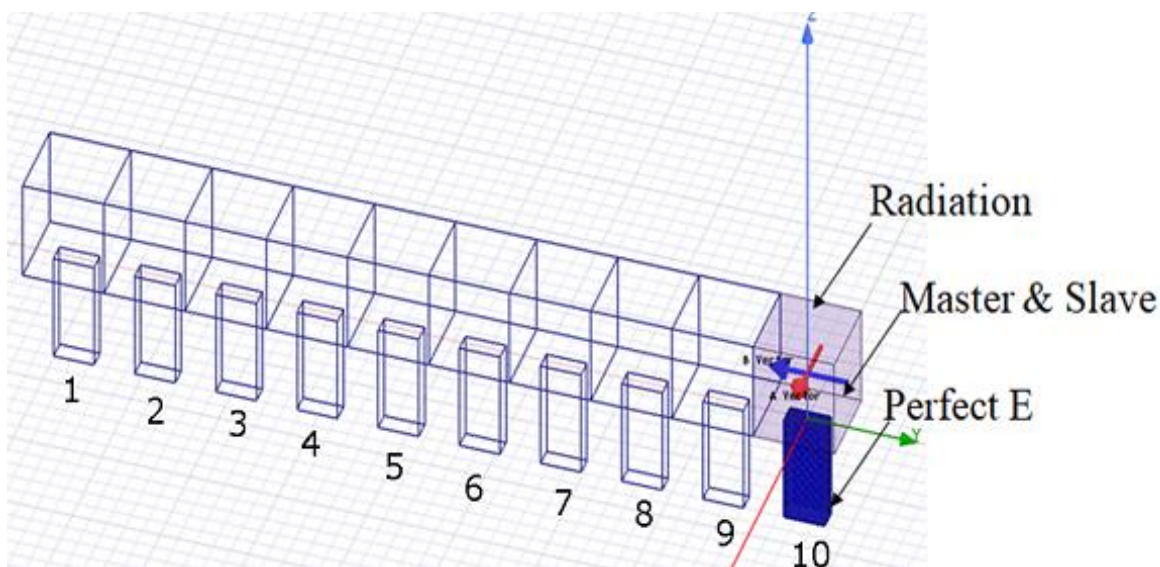


Рис. 9. Антенная решетка, состоящая из 10 расположенных антенн

Создание ФАР в Savant собственными средствами. Для создания и анализа антенной решетки собственными средствами Savant, нужно рассчитать ДН элемента ФАР в 3D HFSS и затем экспортировать в сцену в виде файла ДН. Эта ДН видна на рис. 9. Далее в диалоге Antenna Array Properties (рис. 10) вводится структура антенной решетки (ориентация, расстояние между элементами, количество элементов ФАР). На рис. 10 показаны 10 антенн, расставленных вдоль оси X на расстоянии 30 мм. Размеры отдельных возбуждителей и параметры просмотра можно изменить в диалоге (рис. 10). В разделе Apertura Taper можно установить линейное, косинусное или треугольное распределение возбуждения элементов ФАР.

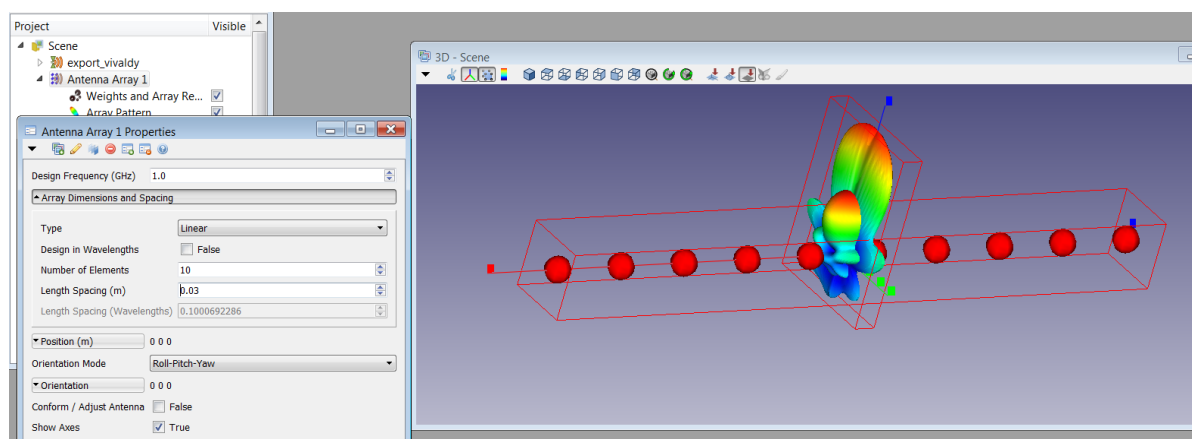


Рис. 10. Выбор геометрических характеристик ФАР, создаваемой в SAVANT собственными средствами

Выполнив моделирование методом SBR, можно вывести на график сечения ДН, изменяя фазы возбуждения отдельных элементов. На рис. 11 показаны на одном графике сечение одного элемента антенной решетки, рассчитанной в 3D HFSS, и сечение ДН ФАР, созданной в Savant собственными средствами и установленная на самолете.

Ценным является сравнение ДН антенной решетки, рассчитанной в 3D HFSS, сечение ДН антенной решетки, рассчитанной в Savant. На график (рис. 11) нанесена также ДН одного элемента ФАР.

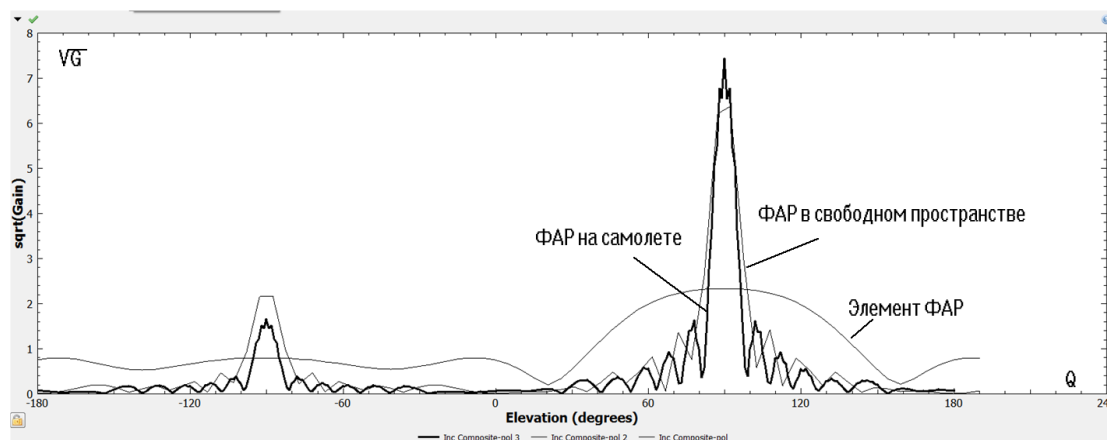


Рис. 11. Сравнение сечений ДН для ФАР, стоящей на корпусе самолета, в свободном пространстве, а также отдельного элемента антенной решетки

При расчете диаграммы сканирования важным является расчет уровня боковых лепестков и изменения коэффициента отражения в сечении каждой антенны от угла сканирования главного луча (рис. 12). Расчеты показывают, что постановке антенны на корпус самолета основными отражающими элементами будут крылья, вентиляторы, хвост и в меньшей степени, нос самолета. Заметим, что при таком расположении антенны мы наблюдаем переотражение практически от каждого узла самолета, и это сказывается на качестве принимаемого сигнала. Из характеристик рис. 12, полученных в Savant, видно, как изменяется ДН антенны, стоящей на самолете, при сканировании главного лепестка в пространстве. Можно вывести зависимость характеристики главного луча (его уровень и ширину), а также уровни боковых лепестков при изменении положения главного лепестка от 0 до 90°.

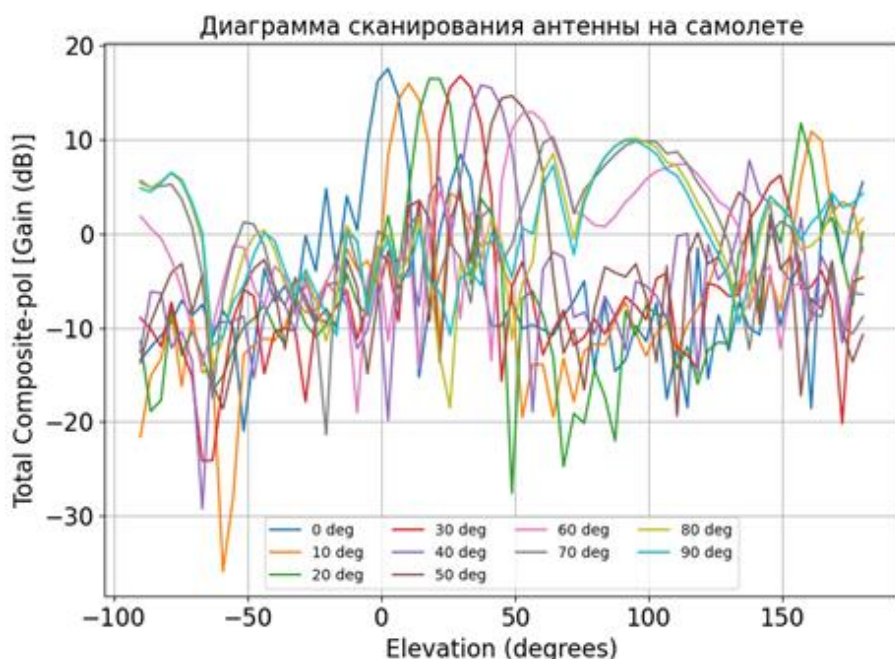


Рис. 12. Диаграмма сканирования ФАР, стоящей на корпусе самолета

Корпус самолета и его положение пространстве также влияет на обнаружение его системами ПВО. Схемы радиолокации, производящей сканирование воздушного пространства показаны на рис. 13.

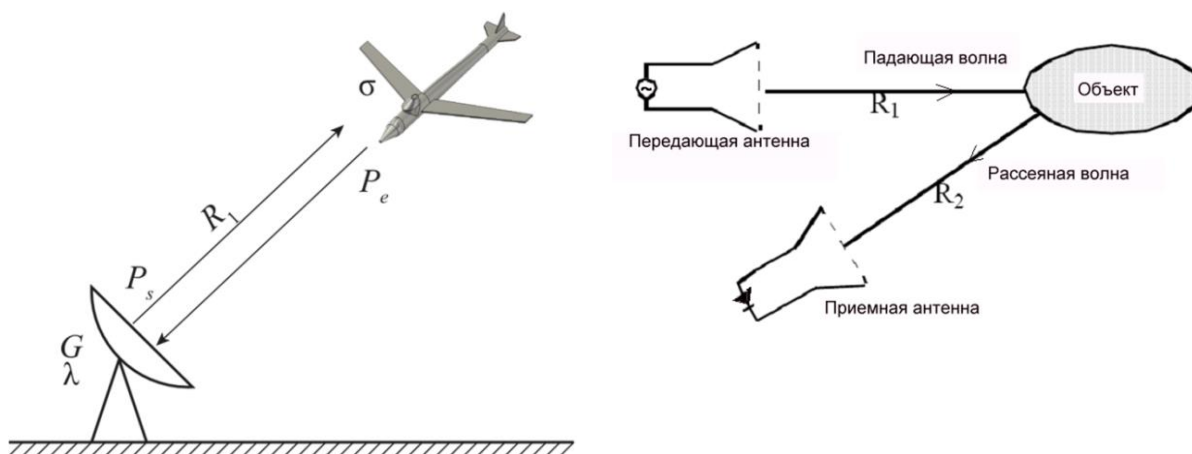


Рис. 13. Схемы радиолокации

а) однопозиционная радиолокационная станция (РЛС) (расчет моностатического ЭПР)

б) двухпозиционная РЛС (расчет бистатического ЭПР)

Для расчета мощности сигнала, отраженного от цели, используется основное уравнение радиолокации [6-7], в которое входит эффективная площадь рассеяния ЭПР, являющаяся показателем радиолокационной заметности цели. Несмотря на то, что показатель ЭПР имеет размерность m^2 , он не является геометрической площадью, а является энергетической характеристикой, то есть представляет собой коэффициент, который учитывает отражающие свойства цели и зависит от пространственной конфигурации цели, электрических свойств её материала и линейных размеров.

В радиолокационных задачах распознавания и классификации целей обычно пользуются радиолокационным портретом воздушной цели (так называемой сигнатурой), который связан с геометрическими и физическими свойствами цели.

Параметры RCS и ЭПР связаны выражением $RCS = \frac{\sigma}{\lambda^2}$, где λ – длина волны в свободном пространстве, σ – ЭПР в м², RCS – радиолокационная площадь сечения, которую иногда называют радиолокационным коэффициентом отражения. Этот параметр используется для оценки возможности обнаружения объекта (цели) с помощью радиолокатора.

В случае расчета моностатического RCS, передающая антенна, облучающая исследуемый объект и приемная антенна, принимающая отраженные от него волны находятся в одном месте (рис. 13а). И их координаты меняются одновременно. При расчете бистатического RCS приёмная и передающая антенны находятся в разных точках, при этом приёмная антенна стоит фиксировано, т.е. в одном месте (рис. 13б).

ЭПР определяется через напряженность электрического поля падающей на объект волны E_{nad} в месте расположения объекта и напряженность поля волны отраженной объектом в направлении расположения приемной антенны E_{omp} в месте расположения приемной антенны, $\sigma = 4\pi r^2 |E_{omp}|^2 / |E_{nad}|^2$, где r – расстояние от объекта до приемной антенны. Хотя в формулу для ЭПР входит расстояние r , значение ЭПР не зависит от расстояния до цели. ЭПР зависит только от геометрии и покрытия облучаемого объекта. ЭПР самолета (или ДПЛА [8]) рассчитаем, используя метод интегральных уравнений, реализованный в HFSS.

Результаты теоретического расчёта ЭПР простых тел (сферы и прямоугольной пластины) [6] и расчёта с применением HFSS ANSYS совпадают с допустимой долей погрешности, обусловленной особенностями программы (в частности величиной разбиения сетки). Таким образом, можно сделать вывод, что выбранная программа удовлетворяет требованиям проведения качественного анализа ЭПР тел разной геометрической формы.

Расчет характеристики дальнего поля в виде моностатического ЭПР приведем на рис. 14. Для обнаружения ДПЛА летящего на цель выполним расчет моностатического ЭПР. Его зависимости от угла падения плоской волны для ДПЛА, меньше реального размера на множитель Scale, приведены на рис. 14.

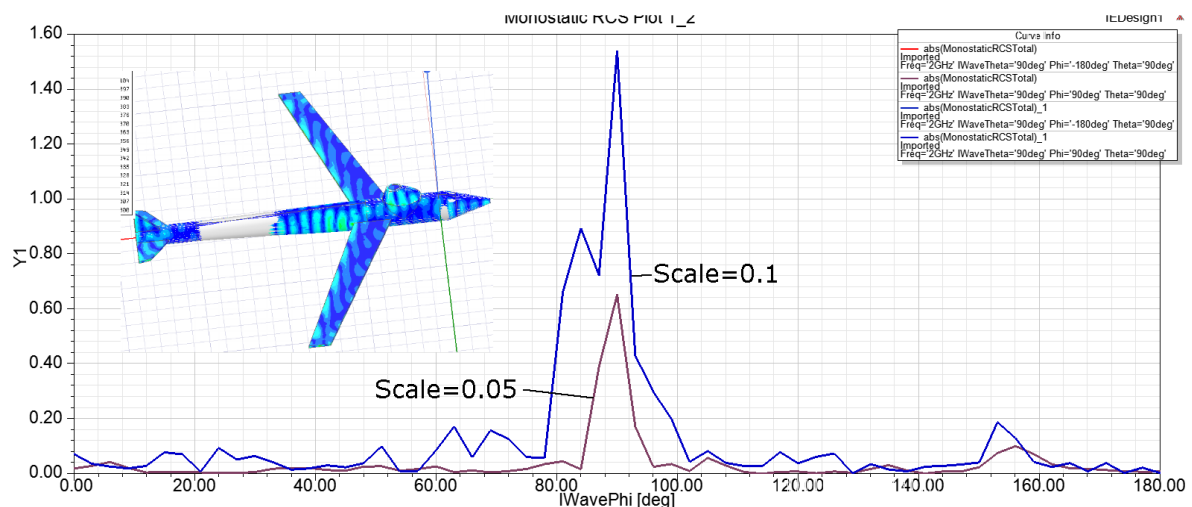


Рис. 14. Моностатический ЭПР в азимутальной плоскости

Учитывая линейный характер изменения ЭПР при увеличении размеров ДПЛА (при котором Scale меняется от 0.05 до 1), и проведя серию расчетов, получим для реального размера самолета значение ЭПР со стороны носа самолета, равной 0.4 м^2 , а со стороны корпуса 40 м^2 .

При таком расчете поверхность ДПЛА была разбита на 8040 треугольников (рис. 14), и это показывает, что характеристики обнаружения малогабаритных и средней величины ДПЛА можно рассчитать на персональных компьютерах. На основании этих значений можно определить требуемую чувствительность приемника, излучающую мощность передатчика радиолокационной станции и КНД антенны.

Выводы. Внедрение численных методов проектирования в инженерное исследование и проектирование открывает широкие возможности как в плане физической наглядности результатов расчета, так и учета явлений, которые не поддаются простому объяснению. Например, в случае расчета ФАР имеется возможность учесть взаимную связь между всеми излучателями и рассчитать слепые углы, при которых резко падает усиление антенны из-за связи антенн.

Программа Savant обладает широкими возможностями для учета поглощения покрытий ДПЛА, для задания самых разнообразных материалов и многослойных покрытий. Применение программы HFSS, обладающей мощной подпрограммой с реализованными асимптотическими методами расчета, позволяет решить эти важные научные и технические задачи.

В настоящее время большинство сложных научных СВЧ и антенных задач можно решить только численными методами. К ним относятся задачи электромагнитной совместимости, проектирование сверхмалых антенн, проектирование систем радиоидентификации, дистанционно пилотируемых летательных аппаратов, антенных решеток, решение задач распространения радиоволн в сложной искривленной среде, в шахтах, в проектировании охранных систем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят доктора технических наук, профессора **Когана Бориса Лазаревича** и доктора технических наук, профессора **Банкова Сергея Евгеньевича** за помощь в работе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Блог: ANSYS Savant [Электронный ресурс] / CAECLUB : [Сайт]. – URL: <https://caeclub.ru/publications/ansys-savant> (дата обращения 22.10.2023).
2. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
3. Боровиков, В. А. Геометрическая теория дифракции / В. А. Боровиков, Б. Е. Кинбер. – М.: Связь, 1978. – 248 с.
4. Грибанов, А. Н. Асимптотические методы электродинамики в ANSYS HFSS / А. Н. Грибанов, И. А. Кузнецов, А. А. Курушин. – М.: САМ Полиграфист, 2019. – 340 с.
5. Уфимцев, П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции / П. Я. Уфимцев. – М.: Советское радио, 1962. – 237 с.
6. Белоцерковский, Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства / Г. Б. Белоцерковский. – М.: Советское радио, 1975. – 336 с.
7. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы: учебник для вузов / П. А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
8. Чистяков, Н. В. Главный конструктор ДПЛА / Н. В. Чистяков. – М.: САМ Полиграфист, 2017. – 270 с.

Поступила в редакцию 10.01.2024 г., рекомендована к печати 30.01.2024 г.

SIMULATION ANTENNA ARRAY ON AIRPLANE

Ignatev N.O., Kurushin A.A.

Using asymptotic methods for calculating Antenna Array (using geometric and physical optics), radiating systems on the aircraft body are modeled. The program "Savant", which is part of the HFSS ANSYS, is used to calculate the scan diagram of the phased array antenna. This allows to identify the appearance of false targets and blind corners of headlights standing on an airplane. The calculation of the effective scattering area (monostatic and bistatic RCS) shows the stealth of the airplane when it exposed by Radio defense systems.

Keywords: HFSS ANSYS program, SAVANT, geometric and physical optics methods, phased array antenna, scanning diagram, false targets in radar, blind spots of radar, remote piloted aircraft.

Игнатъев Никита Олегович

студент ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: nikita-ignatiev@mail.ru

Ignatev Nikita Olegovich

Student of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

Курушин Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: kurushin@mail.ru

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Radio Technical Devices and Antenna Systems of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN FXYXWV
УДК 004.852

DOI 10.5281/zenodo.10974569

ПРЕДСКАЗАНИЕ УСПЕШНОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОНЛАЙН-КУРСОВ С ПОМОЩЬЮ КЛАССИФИКАТОРА RANDOM FOREST

© 2024 *Елисеев В.О., Бондаренко В.И.*

Проведено исследование по тонкой калибровке классификатора Random Forest, предсказывающего успешность прохождения пользователем образовательных онлайн-курсов по данным о действиях пользователя на курсе и его отправках решений практических задач. Рассматривались классификаторы большого и среднего размера. Полученные результаты показывают нецелесообразность десятикратного увеличения количества решающих деревьев в виду незначительного прироста в точности и значительного падения в производительности, преимущество использование классификатора средних размеров (менее 100 решающих деревьев).

Ключевые слова: бинарный классификатор, случайный лес, ROC AUC, тонкая калибровка.

Введение. В настоящее время достаточно актуальна тема дистанционного обучения и получения знаний в онлайн-формате наряду с классическим вузовским дистанционным обучением.

Одной из ведущих российских платформ онлайн-курсов является Stepik (<https://stepik.org>), которая содержит множество как платных, так и бесплатных курсов и предоставляет пользователю удобный интерактивно-геймифицированный опыт обучения. Однако в среднем, только 10% пользователей, записавшихся на курс, проходят его до конца [1].

В связи с этим появляется задача предсказания факта успешного прохождения пользователем курса как можно раньше, с целью проведения своевременных мотивационных работ, либо же пересмотра структуры курса, сложности предлагаемых задач и других факторов, которые могут быть выявлены в ходе анализа информации о прохождении курса и построения предсказания на их основе.

Для решения подобной задачи необходимо выполнить следующие шаги:

- выбрать курс на платформе, для которой будет проводиться анализ;
- получить данные о действиях пользователей, совершаемых с выбранным курсом;
- провести предварительный анализ и предобработку «сырых» данных.
- по результатам анализа выделить эвристику, различающую пользователей, бросивших курс и проходящих либо же прошедших его;
- на основе выбранной эвристики разделить пользователей на покинувших курс и нет;
- выбрать модель машинного обучения, натренировать ее на обработанных данных.

Для решения конкретной задачи были выбраны данные о действиях пользователей на курсе «Введение в анализ данных в R» на платформе Stepik, поскольку эти данные находятся в открытом доступе и предназначены для научных исследований.

При выборе способа создания предсказывающей модели машинного обучения есть 2 варианта: использовать модель глубокого обучения, либо же попытаться решить задачу более простым методом, например – решающими деревьями или более продвинутым вариантом решающих деревьев – случайным лесом. Выбор пал на второй вариант, так как он требует меньше ресурсов в процессе тренировки и способен выдавать точность, близкую к получаемой с помощью моделей глубокого обучения. Поэтому в данной работе будем проводить тонкую калибровку классификатора RandomForest, поскольку нам необходимо получать не просто класс (бросит пользователь курс или нет) а вероятность каждого из исходов, для чего нужно провести дополнительную калибровку. Мы построим 2 откалиброванных классификатора RandomForest – с большим количеством решающих деревьев и с количеством решающих деревьев на порядок меньше, и сравним, дает ли подобного рода усложнение классификатора сообразного прироста в точности и какие побочные эффекты могут возникнуть при его практическом применении (предполагается, что данного рода классификатор может быть использован на бекэнде сервиса Stepik для реагирования на возможные проблемы пользователей, грозящими его уходом с курса), а значит его работа на стадии внедрения не должна сильно тормозить работу сервиса.

Целью работы является создание тонко откалиброванного классификатора типа RandomForest в двух версиях, различающихся количеством решающих деревьев на порядок, дающих оптимальную метрику ROC AUC на тестовых данных (превышающей 0.8) и сравнение целесообразности использования той или иной версии классификатора.

Подготовка набора данных. Для обучения и тестирования модели необходим набор тренировочных и тестовых данных. В нашем случае это будут данные о действиях пользователей в рамках курса «Введение в анализ данных в R» на платформе Stepik, а именно данные за период с момента запуска курса (июнь 2015-го года) до мая 2018 года в качестве тренировочных, и данные о действиях пользователей с конца мая 2018 года до начала 2019-го в качестве тестовых.

Данные представлены в виде пар csv файлов с действиями пользователей со степенями (законченный модуль курса, на основе которых базируется работа на платформе Stepik) и с отправками пользователей решений практических задач для тренировочного и тестового периода соответственно. В сыром виде данные о действиях пользователей со степенями выглядят как показано на рисунке 1, а данные об отправках пользователями решений – как на рисунке 2.

	step_id	timestamp	action	user_id
0	32815	1434340848	viewed	17632
1	32815	1434340848	passed	17632
2	32815	1434340848	discovered	17632
3	32811	1434340895	discovered	17632
4	32811	1434340895	viewed	17632
5	32811	1434340895	passed	17632
6	32929	1434340921	discovered	17632
7	32929	1434340921	viewed	17632
8	32929	1434340939	started_attempt	17632
9	32929	1434340944	passed	17632

Рис. 1. Фрагмент набора данных о действиях пользователей со степенями

step_id	timestamp	submission_status	user_id
0	31971 1434349275	correct	15853
1	31972 1434348300	correct	15853
2	31972 1478852149	wrong	15853
3	31972 1478852164	correct	15853
4	31976 1434348123	wrong	15853
5	31976 1434348188	correct	15853
6	31976 1478852055	correct	15853
7	31977 1434347371	correct	15853
8	31978 1434349981	correct	15853
9	31979 1434446091	correct	15853

Рис. 2. Фрагмент набора данных об отправках пользователями решений практических задач

Далее нам необходимо выделить эвристику, например количество дней отсутствия, по которой мы можем сказать, ушел ли пользователь из тренировочной выборки с курса или успешно его проходит. Также стоит отметить, что долгое отсутствие пользователя не означает покидания им курса, возможно пользователь просто закончил его, получил сертификат и больше не возвращается к курсу.

Для начала определим пороговое число дней, отсутствие пользователя на курсе на протяжении которого будет говорить о том, что пользователь покинул курс. Возможно, пользователь уже завершил курс, но в качестве одной из составляющих классифицирующей эвристики такая метрика будет полезна. Для этого посчитаем для каждого пользователя посчитаем перерывы между его двумя последними заходами на курс. Построим гистограмму и удалим явный выброс, обработанная гистограмма представлена на рисунке 3.

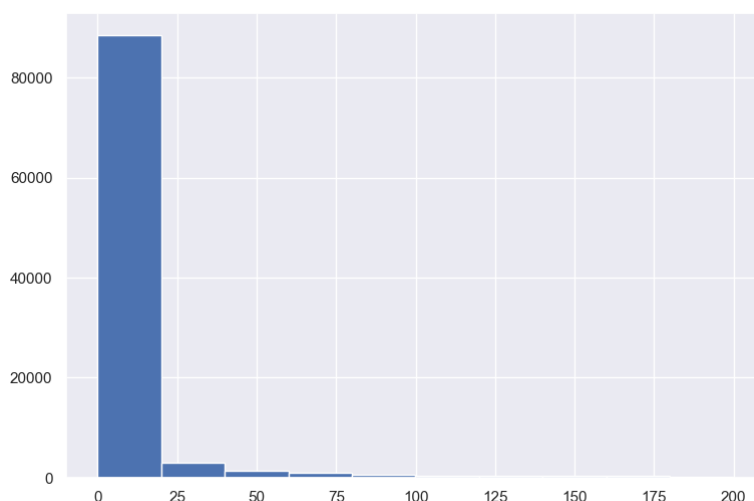


Рис. 3. Распределение перерывов между последними доступами пользователей к выбранному курсу

Как видно, перерывы между доступами к курсу для большинства пользователей находятся в пределах от 0 до 25 дней. Для определения порогового числа дней неактивности на протяжении которых будет означать уход с курса возьмем среднее между 95-м и 90-м перцентилем [2]. Получим значение, равное 39, с помощью следующей строки кода:

```
days_drop_out_threshold = int(np.mean([gap_data.quantile(0.9),  
gap_data.quantile(0.95)]))
```

Полученное значение говорит о том, что в среднем 90-95% пользователей не возвращаются на курс после отсутствия на нем на протяжении 39 дней. Пометим всех пользователей, отсутствовавших на курсе 39 дней как покинувших его. В качестве даты отсчета дней отсутствия на курсе возьмем наиболее позднюю, упомянутую в наборе данных с действиями пользователей.

Далее пометим пользователей, успешно прошедших курс. В качестве критерия успешности возьмем правильное решение пользователем сорока заданий, что для большинства курсов на Stepik является достаточным условием для получения сертификата (сертификат можно получить при 85%-м прохождении курса, для этого в среднем нужно решить 40 заданий). Поэтому сгруппируем наборы данных с информацией о событиях и решениях, введем метку успешного прохождения курса для пользователя, если у него в наборе данных с решениями более сорока записей со статусом «correct». Проверим процент прошедших курс пользователей, он составляет 11.4%, что говорит о правильности рассуждений, так как это число близко к средней доле успешных прохождений по платформе Stepik, равной 10%.

Построим гистограмму, показывающую, за сколько дней большинство пользователей завершает курс. Гистограмма примет вид как на рисунке 4.

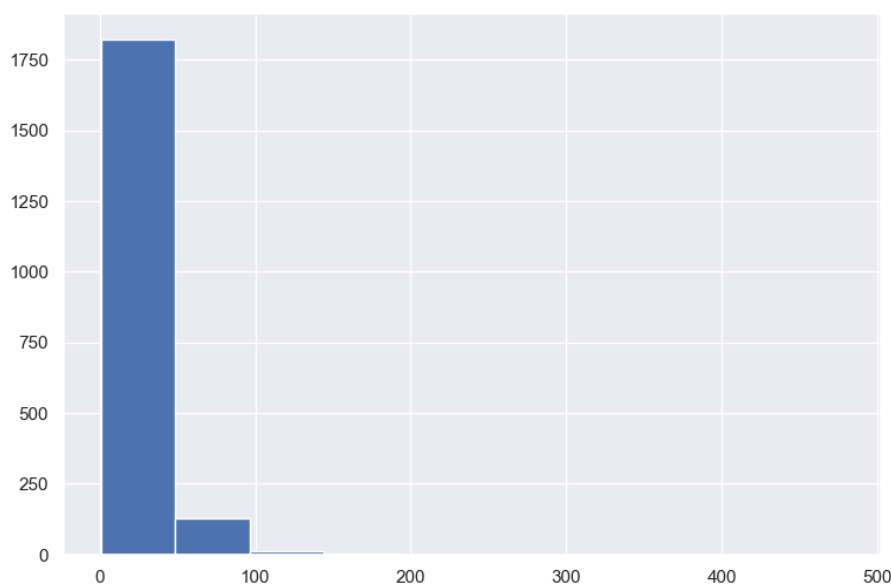


Рис. 4. Распределение количества дней, проведенных прошедшими курс пользователями на нем

Как видно, большинство пользователей проходит курс менее чем за 50 дней. Поэтому в качестве рассматриваемого для предсказания промежутка времени возьмем промежуток, равный двум дням, поскольку нам необходимо принять какие-либо предупреждающие уход пользователя с курса действия как можно быстрее и в то же время нужно собрать как можно больше данных, чтобы сделать прогноз по пользователю более точным. Отфильтруем сгруппированные данные о действиях и отправках решений пользователей за их первые 2 дня пребывания на курсе, а также исключим из рассмотрения тех пользователей, доподлинной информации о покидании курса которыми нет (то есть метки успешного прохождения и выхода из курса – False). Головная часть, полученного такими манипуляциями с наборами данных, представлена на рисунке 5.

	user_id	days	steps_tried	correct	wrong	correct_ratio	viewed	passed_course	is_gone
0	2	1.0	2.0	2.0	0.0	1.00	9	False	True
1	3	1.0	4.0	4.0	4.0	0.50	20	False	True
2	8	1.0	11.0	9.0	21.0	0.30	154	False	True
3	14	1.0	1.0	0.0	1.0	0.00	9	False	True
4	16	2.0	18.0	18.0	23.0	0.44	117	True	True
5	17	1.0	1.0	0.0	2.0	0.00	13	False	True
6	22	2.0	15.0	15.0	9.0	0.62	74	True	True
8	26	1.0	7.0	7.0	16.0	0.30	32	False	True
9	30	1.0	2.0	2.0	0.0	1.00	15	True	True
10	31	2.0	6.0	4.0	5.0	0.44	34	False	True

Рис. 5. Головная часть сгруппированного и отфильтрованного для тренировки модели набора данных

В качестве зависимой переменной возьмем `passed_course`, предварительно приведя ее к типу `int`, после чего удалим метки `passed_course` и `is_gone`, тем самым оставив в исходном наборе данных только независимые переменные. Идентификатор пользователя сделаем индексным столбцом. Теперь у нас выделены зависимые и независимые переменные, а значит можно разделить тренировочные данные на тестовую и тренировочную подвыборки и приступить к обучению модели. Разделение произведем с долей тестовой подвыборки равной 25%.

Обучение модели. В качестве критерия оценки качества натренированной модели возьмем ROC AUC score – площадь под кривой ошибок. Кривая представляет из себя линию от (0,0) до (1,1) в координатах True Positive Rate (TPR) и False Positive Rate (FPR) [3]. Данная метрика показывает, насколько качественным будет результат при изменении пороговых значений вероятности отнесения объекта к тому или иному классу (то есть мы можем сказать, что, если вероятность ухода пользователя с курса равна 40% – будем относить его к ушедшим и так далее), а также более точно характеризует предмет задачи, так как мы имеем дело с несбалансированными классами (как сказано выше – в среднем только 10% пользователей проходят курс до конца).

Тонкая калибровка классификатора под вероятностную оценку имеет место быть, поскольку нас интересует не просто класс пользователя как покинувшего курс или нет, а именно вероятность покидания курса, что в комбинации с увеличиваемой метрикой ROC AUC даст еще более подходящий и гибкий результат. Для предсказания будем использовать метод `predict_proba` [4], в итоговую таблицу для автоматической проверки результата будем заносить `id` пользователя и вероятность его ухода с курса, то есть отнесения его к классу 1.

Как и было сказано в начале статьи, мы проверим классификаторы двух типов: с большим количеством решающих деревьев и количеством решающих деревьев на порядок меньше. Для подбора значения гиперпараметров используем ускоренный метод поиска по сетке – `HalvingSearchCV` [5], в качестве подбираемых гиперпараметров возьмем `n_estimators` (количество решающих деревьев), `max_depth` (максимальная глубина решающего дерева), `min_samples_leaf` (минимальное число записей,

удовлетворяющих условию в листе), `min_samples_split` (минимальное число записей, отделение которого достаточно для следующего деления дерева в глубину). Для произведения тонкой калибровки, обернем объект классификатора `RandomForest` в объект `CalibratedClassifierCV` [6] – стандартные объекты библиотеки `sklearn` [7]. В таблице 1 указаны диапазоны подбираемых значений гиперпараметров для крупного и среднего классификаторов.

Таблица 1. Диапазоны подбираемых значений для рассматриваемых классификаторов

№ п/п	Название гиперпараметра	Диапазон для среднего классификатора	Диапазон для крупного классификатора
1	<code>n_estimators</code>	20...100	20...1000
2	<code>estimator__max_depth</code>	1...10	1...10
3	<code>estimator__min_samples_leaf</code>	5...30 (шаг 2)	5...30 (шаг 2)
4	<code>estimator__min_samples_split</code>	2...20 (шаг 2)	2...20 (шаг 2)

После была запущена процедура подбора наиболее подходящей комбинации гиперпараметров, тренировка модели классификатора с этими гиперпараметрами при использовании кросс-валидации [8, 9] со значением, равным 5. После этого лучшие классификаторы обоих типов были проверены сначала на тестовой подвыборке тренировочного набора данных, а потом на тестовых данных, предоставленных за более поздний период. В таблице 2 представлены результаты тренировки, а также значения гиперпараметров лучших классификаторов, сам процесс тренировки производился на локальной машине, на CPU (Intel Core i5, 8GB RAM).

Таблица 2. Результаты тренировки и применения классификаторов

№ п/п	Показатель	Средний классификатор	Крупный классификатор
1	Время тренировки (минуты)	110	230
2	Скорость кросс-валидационной проверки (секунды)	2.1	22.4
3	score на тестовой подвыборке	0.9001494768310911	0.9005231689088191
4	roc_auc_score на тестовой выборке	0.7672083701076023	0.7698155052887327
5	roc_auc_score на тестовых данных	~0.8877	~0.8878
6	<code>n_estimators</code>	60	640
7	<code>estimator__max_depth</code>	5	5
8	<code>estimator__min_samples_split</code>	12	4
9	<code>estimator__min_samples_leaf</code>	15	7
10	размер файла модели (в МБ)	1.3	14.6

Выводы. По результатам подбора гиперпараметров и тренировки классификаторов можно сказать, что крупный классификатор превосходит средний по количеству деревьев более чем в 10 раз, однако прирост в точности на тестовых данных заметен лишь в 5-м знаке после запятой, что не является столь значимым показателем. Но у крупного классификатора есть один большой недостаток – его время работы. Из приведенных данных в таблице видно, что один прогон кросс-валидации для крупного классификатора требует более 20 секунд, что примерно в десять раз превышает время, затраченное на выполнение аналогичной операции средней моделью. Этот «проигрыш» в производительности крупного классификатора делает его использование в качестве решения для предсказания поведения пользователей на бекэнде платформы Stepik, или

любой другой аналогичной платформы, может оказаться нецелесообразным в свете незначительной выгоды, которую он может принести, выраженной в улучшении точности предсказания в пятом знаке после запятой. Еще одним недостатком крупного классификатора является размер файла, в который он сериализуется – он также превышает в 10 раз размер файла среднего классификатора, что может привести к неудобствам в его использовании на бекэнде.

Поэтому оптимальным для реального использования является классификатор среднего размера, он дает хорошую метрику ROC AUC на тестовых данных, превышающую значение 0.8, что соответствует целям работы, поэтому именно он может быть внедрен для повышения процента успешности прохождения курсов на платформе Sterik. Дальнейшее возможное улучшение классификатора может быть связано с внедрением глубоких нейронных сетей, однако стоит помнить о важности сохранения баланса между качеством работы модели и ее производительностью, размером и в целом затратам на практическое применение.

Исходный код проекта, данные (тренировочные, тестовые, предсказания обоих классификаторов), сами классификаторы в сериализованном виде размещены в открытом доступе: <https://github.com/EliseevVadim/online-course-passing-predictions> и готовы к повторному использованию для воспроизведения экспериментов и / или улучшению итоговых метрик классификаторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Елисеев, В. О. Тонкая калибровка классификатора random forest в задачах предсказания успешности прохождения образовательных онлайн-курсов / В. О. Елисеев, В. И. Бондаренко // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VI Международной научной конференции (Донецк, 26-27 октября 2023 г.) / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Том 2: Физические и технические науки. – Донецк: ДонГУ, 2023. – С. 238-240.
2. Практическая статистика для специалистов Data Science: пер. с англ. / П. Брюс, Э. Брюс. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 304 с.
3. Liu, S. On Estimating ROC Arc Length and Lower Bounding Maximal AUC for Imbalanced Classification / S. Liu // Neural Information Processing Systems. – 2021. – 14 p. – DOI 10.48550/arXiv.2110.09651.
4. How to Use Logistic Regression predict_proba Method in scikit-learn [Электронный ресурс] / SaturnCloud : [Сайт]. – <https://saturncloud.io/blog/how-to-use-logistic-regression-predictproba-method-in-scikitlearn/> (дата обращения 19.10.2023).
5. Tuning the hyper-parameters of an estimator [Электронный ресурс] / Scikit-learn : [Сайт]. – https://scikit-learn.org/stable/modules/grid_search.html (дата обращения 19.10.2023).
6. CalibratedClassifierCV [Электронный ресурс] / Scikit-learn : [Сайт]. – <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.calibration.CalibratedClassifierCV.html> (дата обращения 19.10.2023).
7. Scikit-learn: Machine Learning in Python / F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort [et al.] // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – № 12. – P. 2825-2830. – DOI 10.48550/arXiv.1201.0490.
8. Berrar, D. Cross-validation / D. Berrar // Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology. – 2019. – 4 p. – DOI 10.1016/B978-0-12-809633-8.20349-X.
9. Bates, S. Cross-validation: what does it estimate and how well does it do it? / S. Bates, T. Hastie, R. Tibshirani // Journal of the American Statistical Association. – 2021. – 38 p. – DOI 10.1080/01621459.2023.2197686.

Поступила в редакцию 25.12.2023 г., рекомендована к печати 19.01.2024 г.

PREDICTING THE SUCCESS OF ONLINE EDUCATIONAL COURSES USING THE RANDOM FOREST CLASSIFIER

Eliseev V.O., Bondarenko V.I.

A study was conducted on the calibrating of a Random Forest classifier for predicting the success of users in completing online educational courses, using data on user interactions within the course and their submissions of practical assignments. Classifiers of both large and medium sizes were considered. The obtained results demonstrate the impracticality of a tenfold increase in the number of decision trees due to marginal improvements in accuracy and significant performance degradation. The advantage lies in the use of a medium-sized classifier (less than 100 decision trees).

Keywords: binary classifier, Random Forest, ROC AUC, calibrating.

Елисеев Вадим Олегович

магистрант кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, Донецк
eliseevv02@mail.ru

Eliseev Vadim Olegovich

Master student at Department of Computer
Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Бондаренко Виталий Иванович

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: bondarenko@donnu.ru

Bondarenko Vitalii Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor at Department of
Computer Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО РАСПОЗНАВАНИЮ РУКОПИСНЫХ СИМВОЛОВ ЗА СЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ

© 2024 *Перевышин В.Г., Ковальчик Р.В.*

В данной работе предложен способ подготовки данных для обучения нейронных сетей по распознаванию рукописных символов, позволяющий повысить точность их работы.

Ключевые слова: датасет, стохастический градиентный спуск, батчи, итерации, эпохи.

Введение. Важным этапом, влияющим на точность предсказания в задачах машинного обучения (ML), является подготовка статистических данных для обучаемой модели. «ML сильно зависит от данных. Это самый критически важный аспект, благодаря которому и возможно обучение алгоритма» [1]. Подготовка данных в задачах машинного обучения может, а в ряде случаев должна включать в себя такие этапы как отсеивание неинформативных данных.

Данная проблема актуальна при обучении нейронных сетей, распознающих рукописные символы. В случае с распознаванием рукописных символов к таким данным можно отнести поля на изображениях символов, применяемых для обучения и тестирования, как, например, поля в Dataset “MNIST” (рис. 1).

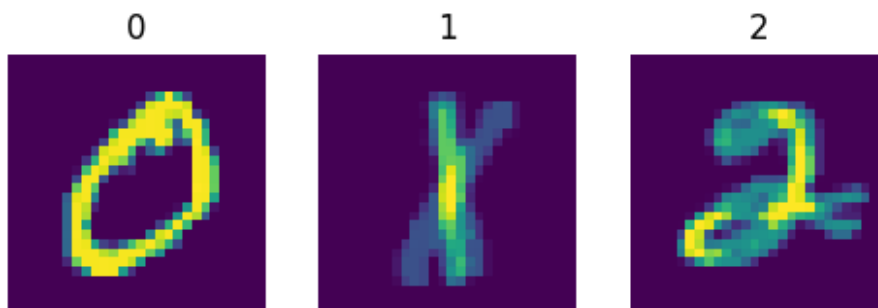


Рис. 1. Рукописные цифры из датасета MNIST

Постановка задачи. При обучении нейронных сетей встречаются случаи, когда данные для обучения содержат много «пустой» информации. В случае с обучением нейронной сети распознаванию рукописных символов к такому типу информации относятся поля, окружающие символы. Нулевые данные при применении к ним коэффициентов весов не будут изменять выход нейронной сети, сколько бы прогонов и эпох обучения мы бы не запускали, поскольку произведение входного значения, равного нулю, на вес W , всегда будет равно нулю. При этом данные вычисления будут потреблять ресурсы оперативной памяти и требуют затрат времени. Предложен и реализован подход к решению описанной выше проблемы.

Анализ данных из датасета “MNIST” показывает наличие неинформативных полей. Для наглядности на рис. 1 несколько изображений цифр наложены друг на друга (две единицы и две двойки совмещены в одном представлении, совпадающие пиксели - более яркие). Неинформативные поля обозначены серым цветом на рис. 2.

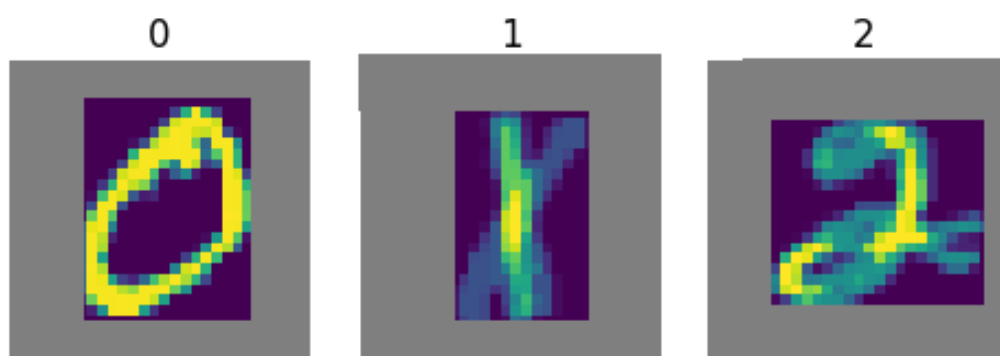


Рис. 2. Рукописные цифры из датасета MNIST с обозначенными неинформативными полями (серым)

Также наличие неинформативных полей при подаче на вход изображения, в различных масштабах, с разными смещениями от центра, приводит к увеличению несовпадению пикселей с тренировочной выборкой.

На рис. 3 показаны новые для сети данные красным, а изображения, на которых обучается сеть – желтым, видно на сколько не совпадают изображения.

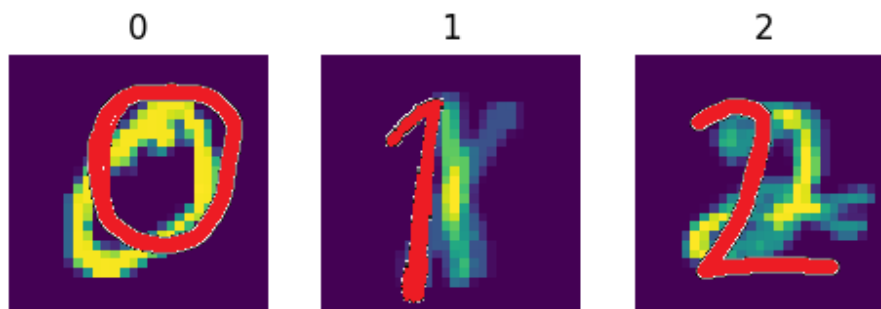


Рис. 3. Данные для обучения (желтого цвета) и тестирования (красного цвета)

В данной работе предложен способ оптимизации данных для обучения за счет игнорирования областей изображения, которые не несут информации, в совокупности с обработкой тестовых изображений, также с игнорированием пустых полей. Такой подход позволит повысить точность распознавания изображений нейронной сетью, т.к. повысится количество совпадающих ненулевых пикселей тестовых изображений с обученными данными.

С целью реализации предложенного способа оптимизации при обучении нейронной сети будем использовать только полезные информативные области изображения, назовем их USEFUL_AREA, а пустые поля будем исключать из обработки. Преобразованные изображения цифр помечены на рисунке 4 словом “scaled”:

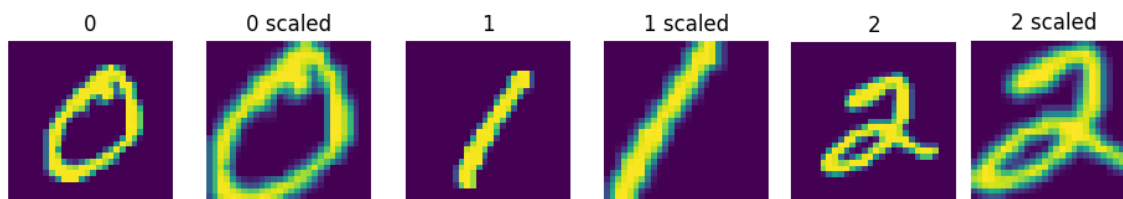


Рис. 4. Изначальные и преобразованные (scaled) изображения рукописных цифр

На рис. 5 приведены изображения, подающиеся на вход нейронной сети (обозначенные красным цветом), которые следует обрабатывать таким же образом и учитывать только USEFUL_AREA, что повысит количество совпадающих пикселей.



Рис. 5. Преобразованные (scaled) изображения рукописных цифр (обучаемые изображения желтые, тестовые - красные)

В результате данного подхода повышается уровень совпадения с тренировочной выборкой.

Для решения описанной выше проблемы была предложена и реализована предварительная собственная трансформация набора данных “MNIST” перед использованием данных для обучения и тестирования моделей по распознаванию рукописных символов. В данном примере такая трансформация была реализована при помощи функции, имеющей название UsefulPixels, и класса UsefulPixelsTransform, в котором используются данные, возвращенные из функции UsefulPixels.

Изначально загружаемые изображения содержат неинформативные пустые поля. Функция UsefulPixels возвращает границы (координаты) изображения, содержащие только полезную площадь. Эти данные затем используются в классе UsefulPixelsTransform, в котором также реализовано преобразование изображений к изначальному формату, но уже без неинформативных полей. Именно эти изображения используются в дальнейшем для обучения нейронной сети и тестирования адекватности полученной модели. Суммарная трансформация данных, в зависимости от значения флага ONLY_USEFUL_AREA, может включать как преобразование данных к тензору и собственную трансформацию, реализованную, как описано выше, так и только преобразование к тензору без собственной трансформации [2].

Ниже приведен фрагмент программного кода реализации предварительного преобразования изображений.

```
import torchvision.transforms.functional as TF
import random
ONLY_USEFUL_AREA = False
def UsefulPixels(img): # находим первый и последний ряд r1 и r2 и первую и
последнюю колонки c1 и c2, в которых ненулевые данные
    r1, r2 = img.shape[0], 0
    c1, c2 = img.shape[1], 0
    for r in range(img.shape[0]):
        for c in range(img.shape[1]):
            if r<r1: if img[r,c] > 0: r1=r # если пиксель ненулевой, то ряд r1 найден
            if r>r2: if img[r,c] > 0: r2=r # ряд r2 найден
            if c<c1: if img[r,c] > 0: c1=c
            if c>c2: if img[r,c] > 0: c2=c
    if r1>r2: return 0, img.shape[0], 0,img.shape[1]
    return r1, r2, c1, c2
```

```

class UsefulPixelsTransform():
    def __init__(self, rc, size_out=(28,28)):
        self.size_out = size_out
    def __call__(self, x):
        x2 = np.asarray(x)
        r1, r2, c1, c2 = UsefulPixels(x2)
        delta = max(r2-r1, c2-c1)
        return TF.resized_crop(x, r1, c1, delta, delta, self.size_out)
# трансформация возвращает полезную область изображения, приведенную к
исходному размеру
if ONLY_USEFUL_AREA:
    tr = tv.transforms.Compose([UsefulPixelsTransform(size_out=(28,28)),
tv.transforms.ToTensor()])
else:
    tr = tv.transforms.Compose([tv.transforms.ToTensor()])
mnist = tv.datasets.MNIST(root = 'data', download = True, transform=tr) # загрузка
набора изображений MNIST
dl = td.DataLoader(mnist, batch_size=16, num_workers=0, shuffle=True,
drop_last=True) # настройка загрузчика порциями по 16 изображений

```

Алгоритм, реализованный в функции UsefulPixels, обнаруживает ряды и колонки, по которым необходимо произвести обрезку неинформативных полей. Для этого выполняется вложенный цикл, в котором для каждого пикселя исходного изображения выполняется сравнение с нулем, поскольку интенсивность изображения для полей равна нулю. Таким образом реализуется нахождение крайних контуров рукописных знаков в исходных изображениях со всех сторон и формируется новое изображение, которое уже не содержит неинформативных полей.

Архитектура нейронной сети [3] реализована в классе TwoLayersNet и состоит из двух полносвязных слоев и функции активации ReLU. Программный код реализации нейронной сети приведен ниже.

```

class TwoLayersNet(nn.Module): # класс сети
    def __init__(self, nX, nH, nY):
        super(TwoLayersNet, self).__init__()
        self.flat = nn.Flatten()
        self.lin1 = nn.Linear(nX, nH)
        self.lin2 = nn.Linear(nH, nY)
        self.act = nn.ReLU()
    def forward(self, x): # метод прогона данных через полносвязные слои
        x = self.flat(x)
        x = self.lin1(x)
        x = self.act(x)
        x = self.lin2(x)
        x = self.act(x)
        return x
model = TwoLayersNet(28*28, 100, 10) # создаем экземпляр класса сети
optimizer = torch.optim.SGD(model.parameters(), lr=0.001, momentum=0.9) # в
качестве оптимизатора задан стохастический градиентный спуск
loss_f = nn.CrossEntropyLoss() # функция потерь

```

```

def accuracy(pred, label):      # точность предсказаний
    result = f.softmax(pred.detach()).argmax(1) == label.argmax(1)
    return result.sum().item()

for epoch in range(5): # запускаем прогон 5-ти эпох обучения
    loss_val = 0
    acc_val = 0
    print("epoch: ", epoch)
    for img, label in tqdm(dl):
        optimizer.zero_grad()      # обнуление градиентов
        label = nn.functional.one_hot(label,10).float() # искомый результат
        predict = model(img)        # предсказанный результат
        loss = loss_f(predict,label) # потери (разность искомого и предсказанного)
        loss.backward()             # обратный спуск (в сторону минимума ошибок)
        loss_val += loss.item()     # суммируем потери по эпохе
        optimizer.step()           # оптимизация коэффициентов
        acc_val += accuracy(predict, label) # точность предсказаний порции данных
    print("loss",      loss_val/len(dl)/dl.batch_size,      "      accuracy:      ",
acc_val/len(dl)/dl.batch_size)      # средние потери и точность по эпохе

```

Для сравнения обучим сначала нейронную сеть, не используя класс UsefulPixelsTransform, который реализует поставленную задачу подготовки данных для обучения. В таком случае после реализации 5 эпох обучения получаем величину точности равную 0,9416, ее значение содержится в переменной accuracy:

accuracy: 0.9416

Затем были использованы собственные тестовые изображения (они приведены на рисунке 6) для распознавания нейронной сетью:

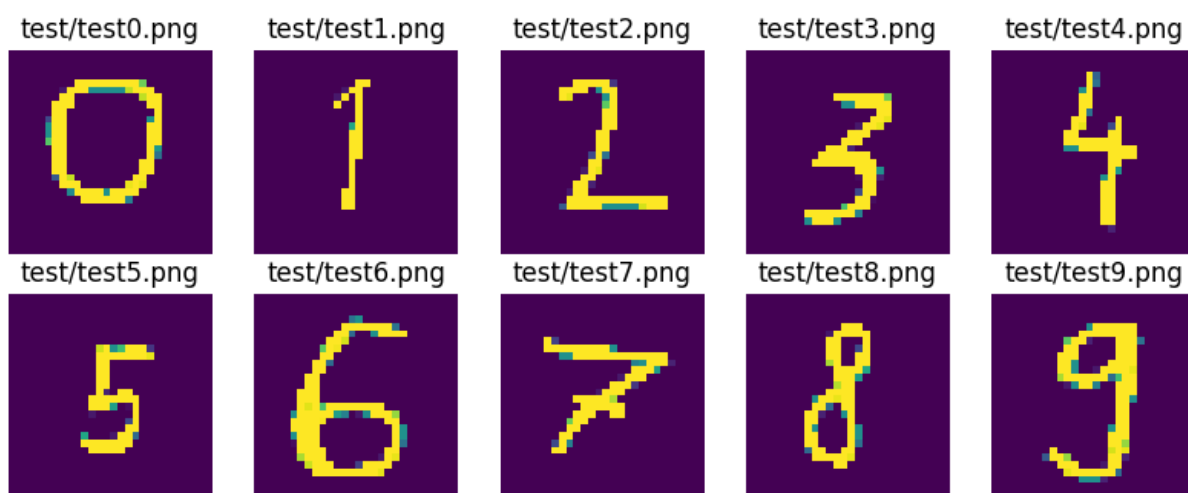


Рис. 6. Собственные изображения для распознавания нейронной сетью

В коде ниже представлены алгоритм предсказания нейронной сети на собственных изображениях, приведенных на рисунке 6.

```

import cv2
def useful_area_img(img0, size=(28,28)):
    r1,r2, c1,c2 = UsefulPixels(img0) # находим границы полезной области
    delta= max(r2-r1,c2-c1) # максимальная ширина/высота области
    img = img0[r1:r1+delta, c1:c1+delta] # берем участок найденной области
    return cv2.resize(np.asarray(img),size) # преобразуем участок в исходный размер

def PredictDigitFromImage(filename):
    testimage = cv2.imread(filename, cv2.IMREAD_COLOR) # считываем файл
    testimage = cv2.cvtColor(testimage, 10, cv2.COLOR_RGB2GRAY) # преобразуем
в серые оттенки
    if ONLY_USEFUL_AREA:
        testimage = useful_area_img(testimage,(28,28)) # преобразуем полезную
площадь в исходный размер
    else:
        testimage = cv2.resize(testimage,(28,28)) # или преобразуем всё изображение в
исходный размер
    testimage = np.expand_dims(testimage,axis=0) # добавляем измерения
    testimage = np.expand_dims(testimage,axis=0) # для размерности (1,1,28,28)
    testimage = testimage.astype(np.float32) / 255.0 # переводим пиксели из
интенсивности 0..255 в 0..1, согласно обучаемой выборке
    img= torch.from_numpy(testimage) # переводим в тензор
    prediction = model(img) # получаем предсказание вероятностей сети
    pred_lab = f.softmax(prediction.detach()).argmax(1) # выбираем самое вероятное
    print(f"\n Prediction for " + filename + " : ", pred_lab.item())
    print(prediction)
    return pred_lab.item() # возвращаем предсказание

right_pred = 0
s = "0123456789"
for x in s:
    pred = PredictDigitFromImage("test/test" + x + ".png")
    if pred == int(x): # если предсказание совпадает с названием цифры
        right_pred += 1 # то увеличиваем счетчик правильных предсказаний
print("accuracy : ", right_pred / len(s))

```

В результате тестирования нейронной сети на собственных изображениях получена невысокая точность (из 10-ти тестовых изображений правильный результат получен только для шести). В данном случае точность составила всего 0,6.

accuracy: 0.6

Теперь применим предлагаемый метод, установив флаг ONLY_USEFUL_AREA = True. После 5-ти эпох обучения полученная точность составила:

accuracy: 0.9467333333333333

Протестировав сеть на собственных изображениях (из 10-ти тестовых изображений правильный результат получен уже для девяти):

accuracy: 0.9

В таблице 1 приведены результаты сравнения точности при обучении с использованием предварительной обработки изображений и без него.

Таблица 1. Результаты сравнения точности нейронной сети

Обучение нейросети	Точность при обучении с изображениями из MNIST	Точность при обучении на собственных изображениях	Время обучения, мин.
Без UsefulPixels	0,9416	0,6	1,2
С UsefulPixels	0,9467333333333333	0,9	12,5

Как следует из приведенных результатов, точность при обучении улучшилась незначительно (на ~0,5%) при использовании данных из MNIST, однако на собственных изображениях результат оказался более существенным и улучшился с 60% до 90%.

Выводы. Таким образом, предложенный метод предварительной подготовки данных для обучения нейронных сетей можно использовать при обработке наборов данных, в которых содержатся пустые области (например, обрамление изображения, состоящее из нулей), которые не несут полезной информации и их можно не учитывать при обучении модели.

Точность при обучении сети вырастает незначительно, однако при новом незнакомом наборе данных предсказания получаются намного точнее (даже при простой архитектуре сети, состоящей из двух полносвязных слоев).

Существенным недостатком данного метода является увеличение времени обучения в 10 раз. Его можно избежать, если перед загрузкой Dataset обработать изображения в отдельный Dataset (сохранить преобразованные изображения в отдельный набор) и обрабатывать его уже без поиска пустых областей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Подготовка датасета для машинного обучения: 10 базовых способов совершенствования данных [Электронный ресурс] / Хабр : [Сайт]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/684580/> (дата обращения 29.07.2023).
2. Writing Custom Datasets, DataLoaders and Transforms [Электронный ресурс] / PyTorch : [Сайт]. – URL: https://pytorch.org/tutorials/beginner/data_loading_tutorial.html (дата обращения 10.07.2023).
3. Введение в PyTorch [Электронный ресурс] / Pythonist : [Сайт]. – URL: <https://pythonist.ru/vvedenie-v-pytorch/> (дата обращения 10.07.2023).

Поступила в редакцию 26.12.2023 г., рекомендована к печати 23.01.2024 г.

**IMPROVEMENT OF ACCURACY OF WORK OF NEURAL NETWORKS THROUGH THE USE
PRELIMINARY PREPARATION OF DATA**

Perevyshin V.G., Kovalchik R.V.

This paper proposes a method for preparing data for training neural networks to recognize handwritten characters, which makes it possible to increase the accuracy of their prediction.

Keywords: dataset, stochastic gradient decent, batch, iteration, epoch.

Перевышин Вячеслав Георгиевич

магистрант ФГБОУ ВО «Приазовский
государственный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Мариуполь.
E-mail: vyacheslavperevysh@yandex.ru

Perevyshin Viacheslav Georgievich

Master student of Priazovskyi State Technical
University,
Russian Federation, DPR, Mariupol.

Ковальчик Роман Владиславович

кандидат технических наук, доцент кафедры
информатики и вычислительной техники
ФГБОУ ВО «Приазовский государственный
технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Мариуполь.
E-mail: kovalchykrv@yandex.ru

Kovalchik Roman Vladislavovich

Candidate of Technical Sciences, Associate professor
at Department of Computer Science and
Computational Technique of Priazovskyi State
Technical University,
Russian Federation, DPR, Mariupol.

IMAGE FILTERING METHOD FOR RECOGNIZING THE DESIRED OBJECTS

© 2024 *Mukhamedieva D.K., Mukhamadieva K.B., Bozorboev ZH.U.*

The article formulates the task of preliminary processing of scene images to identify specific objects - route numbers of vehicles on color images obtained by shooting on camera devices. As accessible high-speed methods of pre-processing the Otsu method - a method of reception of optimum approach of the half-tone (grey) image, and also a number of standard methods of local processing in a sliding window is considered. The authors propose two heuristic pre-processing methods: nonadaptive transformation of a color image into gray (sharpness predictor); grey image blur method (BNS method - blurring the neighbors' shades) used to select the contours on the image. The test images show the effect of applying different methods to highlight contours and localize the area of the vehicle route number location on the images. The methods are also compared on other data - color photographs and a three-color cartographic image 1100 data with a dimension of 32x32 pixels.

Keywords: contour highlighting, pixel conversion, object localization, function Otsu.

Introduction. Video surveillance systems are widely used in railway traffic monitoring tasks. These tasks are extremely relevant and affect many aspects of human life. With the advent of digital video cameras, it became possible to process measurement data using a computer, which led to a wide range of new tasks in digital signal processing. Examples of such tasks are perimeter monitoring and detection of a moving object, recognition of a moving object, and identification of an object. Research and development of algorithms for processing video data, as a rule, requires a labor-intensive computational experiment on model and real data of a large volume. Therefore, it is important to correctly organize the computational process when modifying and testing algorithms.

This article discusses ways with low computing power requirements to distinguish wagon numbers from the background. The task is driven by the need to improve the quality and speed of filtering and semantic segmentation of objects in images, to accurately segment wagon numbers from the video stream in real time and to improve the stability and performance of the algorithm in cases of heavy contamination, non-contrast and non-standard of carriage numbers.

In this research, we try to identify the best algorithms that solve the problem of preprocessing the identification number of a railroad car in an image. Then on the image the identification number of the transport is searched by its schematic representation. Subsequently, digits are recognized on the specified sections and registered in the monitoring system [1].

When processing and analyzing digital images, the following steps are usually performed [2]:

- Segmentation of images using binarization and contour selection algorithms;
- Define (search) and describe linked areas;
- Comparison of characteristics of found areas with the standard.

The key stage of identification is comparison of the selected section of the source image with some reference image, using different characteristics such as center of gravity [2], spectral brightness functions [3], principle of estimations consistency or estimation of maximum plausibility [4].

The stage of description of connected areas can be carried out in different ways: calculation of geometrical features [2], application of random sampling algorithm [5], analysis of hyperspectral information, training of neural networks [6]. In this paper the method based on the calculation of geometrical features of the image - relative length and width, the ratio of the perimeter square to the image area, format, center of gravity - was used to describe the regions. To select the areas present in the image, various algorithms are used, such as regional sprawl [7-8], wave growing areas tobogganing. These algorithms are not applicable in tasks with increased image detail, because the main objects in the image are divided into dozens of smaller, no analyzable areas.

Image segmentation starts by applying binarization, contouring, and noise reduction methods individually or in combination. The result of further image processing depends on the quality of this stage. Figure 1 shows a test image on which the quality of the various algorithms of binarization and selection of contours will be checked. test 1 - the image used for tests. The quality result of test 1 processing will be considered a binary image, on which the following criteria are met:

1. The contours of the transport identification number are clearly defined (criterion 1);
2. The number is saved exactly in the image (criterion 2), the information to which must be saved.



Fig. 1. Test image (test 1)

As part of this work, we have implemented and tested various well-known binarization algorithms: the Otsu method (figure 2a), Bradley Roth algorithms (figure 2b), Nibblack, Savuola and Christian Wolf algorithms, and the algorithm for analyzing the arithmetic mean color of a pixel (figures 2c) in the RGB model. The given circumstance has not allowed qualitatively to carry out binarization of images. However among the given group of methods separately stands the approach used in Otsu hierarchical method. The Otsu method is used for grey images, but that it successfully worked in a considered problem, it is enough to apply it repeatedly to each of two clusters of the pixels initially received by an original Otsu method and, then, analyzed as independent images (figure 2c). In fig. 2d is clearly enough to see the identification number of the vehicle.



a)



b)

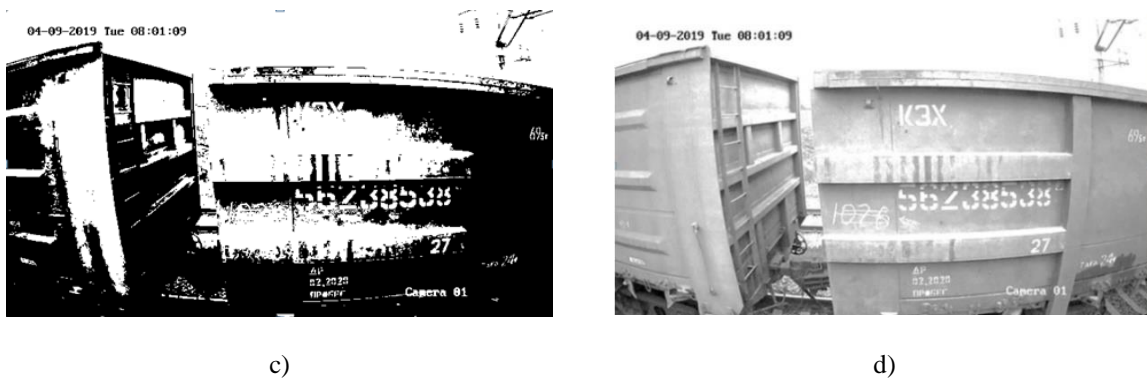


Fig. 2. Binarization of test image (test 1):
 a) by Otsu method; b) by Bradley Roth algorithm;
 c) using the arithmetic mean of pixel colors; d) using hierarchical Otsu method

The following algorithms of contour selection were also implemented and tested: different combinations of Laplacean and Gaussian (fig. 3a), Roberts' operator, Sobel's operator (fig. 3b), Pruitt's operator, Kirsch's operator (fig. 3c), Canny's operator (fig. 3d). The qualitative result was obtained using Laplacean 5x5. Only this operator allowed keeping high informativeness without loss of information quality. Kirsha operator showed also rather qualitative visual results, but the thickness of the received contours does not allow using it further for computer processing. Other algorithms managed to process qualitatively, but with different level of informativeness.

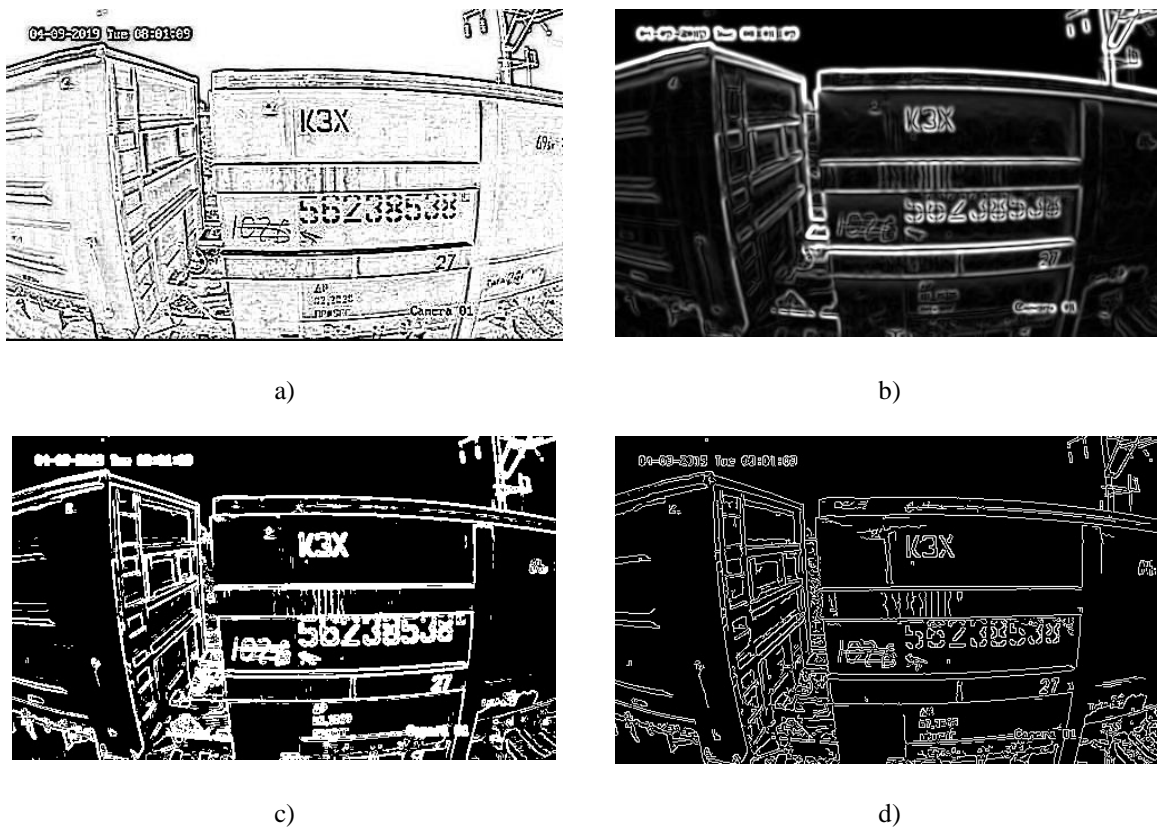


Fig. 3. Selection of the test image contours (test 1):
 a) Laplacean 5x5; b) Sobel operator; c) Kirsch operator; d) Canny operator

As it is visible from results of processing, the images appear superfluous information besides the important detail, namely - besides an identification number in addition figures of a mode of transport that is inadmissible within the limits of a solved problem. Only Otsu hierarchical method sometimes shows acceptable results.

Blurring the neighboring shades. The idea of the method of blurring the neighboring shades (BNS method). To solve the problem we use a low quality image as a test. Figure 4 shows, for an example, the results of the representation of the number "52600707" of the vehicle. The first figure shows the number as seen by its person, and the second figure shows the number as "seen" by its computer in the form of a screenshot. In case of digital raster images there are some shades (presence of a gradient) which can be both shades of the basic colour, and at all absent in a site of the considered image (figure 3b). The idea of the offered method of preliminary processing of images (POC) consists in blurring of "unnecessary" shades at transition from one pixel to another. Transition from one "necessary" pixel to another will be considered as a contour line, everything else - as background.



a)



b)

Fig. 4. Example of image representation (test 2):
a) by the human eye; b) as a raster

Let the digital image with the size of $DimX \times DimY$ pixels be given, which from the mathematical point of view can be represented by a two-dimensional matrix Im . The element of matrix $Im[i, j]$ contains an integer value of the brightness display function $f \in [0, 255]$ according to RGB color model, where $i \in (0, DimX - 1)$, $j \in (0, DimY - 1)$. To select a contour it is necessary to convert initial digital image $Im[i, j]$ into monochrome $G[i, j]$.

By an integer operator that calculates the arithmetic mean of a pixel color $Pix_{i,j} \{r, g, b\}$ with a coordinate (i, j) as follows:

$$Pix_{i,j} \{ \varphi_{i,j}, \varphi_{i,j}, \varphi_{i,j} \},$$

where $\varphi_{i,j} = \frac{r_{i,j} + g_{i,j} + b_{i,j}}{3}$.

The image is converted to monochrome (figure 4) to limit the color spectrum to 256 colors (according to the RGB model), then the selection of the contour is made by the formula:

$$B_{i,j} = \begin{cases} 1, & tp_{i,j} \leq G_{i+j,j+m} + |c_{i,j}| \\ 0, & tp_{i,j} > G_{i+j,j+m} + |c_{i,j}| \end{cases}, \quad (1)$$

where $tp_{i,j} = \frac{1}{9} \sum_{\substack{-1 \leq k \leq 1 \\ -1 \leq m \leq 1}} G_{i+k,j+m}$, $a \ c_{i,j} = \{G_{i+k,j+m}, -1 \leq k \leq 1, -1 \leq m \leq 1\}$.

In the formula (1) $|c_{i,j}|$ - set, consisting of the color of and pixel (i, j) and the colors of pixels surrounding it neighbors, $tp_{i,j}$ - the arithmetic mean of the elements of this set. In the resulting binary image $B[i, j]$ value 1 corresponds to the contour line, and value 0 - to the background. If the power of the set $|c_{i,j}|$ more than four [9], it is believed that pixel (i, j) refers to noise and its power is artificially set to four to increase the probability of its exclusion from the contour line. It is important to note that overlaying one's own conditions on the power of a set can lead to different results. This fact can be applied when a more specific solution is required in contour selection tasks.

The results of contour selection for test 2 are shown in figure 5. In this case, as a result of processing with this algorithm, the image remains informative, as in the case of other classical algorithms.



Fig. 5. Selection of contours by the method (blurring the gray image) of BNS

To achieve criterion 2 on test 2, we will consider pre-processing the image with some predictor that will correct the sharpness of the original image. Several different ways of pre-processing have been suggested by the author of this paper. In this article a new method will be proposed.

Image Sharpness Predictor. To improve the quality of image detail when selecting contours it is necessary to perform image pre-processing, which would average the brightness of all pixels to some constant, and the informative value of the original image should not decrease. The human eye can detect about 30 shades of grey depending on the lighting. Based on this, it is possible to average image areas to a specific grey shade based on the current pixel brightness. However, the bit depth of color (RGB model) is 24 bits, which does not allow you to correctly group 256 shades of gray into 30, so break down the color spectrum of the monochrome image into 24 groups. Thus, each group will consist of $256 / 24 = 10,67 \approx 11$ shades. Then in the processed monochrome image, the hues falling into the group are replaced by the initial hue of this group (table 1).

Table 1. Changing shades

Original shades	New shades	Original shades	New shades	Original. shades	New shades
0..10	0	88..98	88	176..186	176
11..21	11	99..109	99	187..197	187
22..32	22	110..120	110	198..208	198
33..43	33	121..131	121	209..219	209
44..54	44	132..142	132	220..230	220
55..65	55	143..153	143	231..241	231
66..76	66	154..164	154	242..252	242
77..87	77	165..175	165	253..255	253

Figure 6 shows the result of the predictor's work with the original test images. Comparing the images before (fig. 3) and after the predictor's processing (fig. 6), one can conclude that visual detail and informativeness of the image has been saved.



Fig. 6. Predictor treatment result

Figure 7 shows the results of image contour selection by the BNS method using the proposed predictor.



Fig. 7. Selection of contours by BNS method after predictor processing

On the received images all necessary information is saved (requirement of criterion 2 is fulfilled). An additional effect of this approach is excessive detail, but by varying the number of shades (instead of the suggested 30) in the group it is possible to increase or decrease the level of detail of the binary image.

Comparison with other algorithms. The proposed approach (BNS method and predictor) is compared with other popular contour extraction algorithms, such as Canny and Kirsch operators, and Laplacean 5x5. The results of the algorithms were compared by the following estimates:

- Human visual evaluation of contour extraction quality using fuzzy sets;
- Estimating the thickness of the contours of the obtained images;
- Calculated boundary quality assessment based on peak signal-to-noise ratio;
- Estimating the time spent on algorithm execution.

Each of these criteria is discussed in more detail below:

Human visual evaluation. As you can see from the images, each algorithm has its advantages and disadvantages, depending on the original image. To assess the visual quality of the results of each of the algorithms was conducted a survey of fifty respondents who were asked to evaluate the results on a scale of ten points (1 - worst, 10 - best) on three criteria: accuracy of detail, sharpness of contours, image quality in general. The weighted average score of each algorithm's criteria is presented in the table below (table 2). The Otsu hierarchical method has not been considered in comparison, as it applies to grayscale images (with good results on tests).

Table 2. Weighted average score of criteria

Algorithm	Detail assessment	Evaluation of circuits	Quality Assessment
BNS with predictor	5.2	4.94	5.31
BNS w/o predictor	6.16	5.71	4.70
Operator Canny	5.25	5.1	5.03
Operator Kirsha	6.96	7.38	6.81
Operator Laplace	6.57	6.69	6.48

The weighted average score of the evaluated criterion is used as input variables of the fuzzy output system to assess its quality. Each variable is described by one of three terms: P - "bad", U - "satisfactory", X - "good". For each of the three variables, the function of belonging of the kind $\mu(x) = (1.5, 10, 10)$ was set. The output variable "quality of algorithm execution results" is also described by one of the three specified terms. Table 3 provides some rules for determining the relationships between input and output variables.

Table 3. Rules for Relationship between Variables

Details	Contours	Image Quality	Quality of algorithm results
X	X	X	X
X	U	X	X
U	X	U	U
P	U	P	P

After the defuzzification procedure using the center of gravity method and application of the fuzzy conclusion rules, the following results were obtained (table 4). It can be concluded from the obtained results that the results of Kirsch and Laplace operators are the most preferable by visual evaluation. Obviously, this preference was given by the respondents due to the thickness of the obtained contour lines and the accuracy of detail transmission necessary to understand the information that the image carries. It is therefore quite surprising that the use of the Laplace operator is rarely mentioned in other works.

Table 4. Evaluation results in fuzzy sets

Algorithm	Quality of results
BNS with predictor	Satisfactory
BNS w/o predictor	Satisfactory
Operator Canny	Satisfactory
Operator Kirsha	The good one is
Operator Laplace	The good one is

Evaluation of contour thicknesses. When obtaining the contours, the thickness of the selected boundary must tend to one point. To evaluate the feasibility of this criterion in this paper, the contours are selected on the test image. The borders of the image are delineated by a single contour. From the received images without additional calculations it is visible, that method Otsu and the offered method BNS satisfy the given criterion.

Numerical assessment of the quality of border allocation. The peak signal-to-noise ratio (PSNR) method is used for the numerical assessment of boundary selection quality. For this purpose, three indicators are calculated: probability of correct detection, first kind error probability, second kind error probability using formulas (2-4) respectively. Here N_j - number of boundary points in the ideal object contour; N_B - number of boundary points in the object contour obtained during the detection process; TP - number of correctly detected object points; FN - number of points which are boundary points of the object but which were not detected by the boundary detector; FP - number of points which are not boundary points of the object but which were detected by the boundary detector.

$$P_{co} = \frac{TP}{\max(N_I, N_B)}, \quad (2)$$

$$P_{rd} = \frac{FN}{\max(N_I, N_B)}, \quad (3)$$

$$P_{fa} = \frac{FP}{\max(N_I, N_B)}. \quad (4)$$

Calculation of the numerical estimation of the boundary quality is performed according to formulas (5-6), where RE is a relative error determined through the previously considered primitive metrics, in which α is a constant limiting RE from above; b , c , d are weight coefficients which are measures of significance of primitive metrics.

$$RE = (b * P_{co} + \alpha)^{-1} + c * P_{fa} + d * P_{rd}. \quad (5)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{RE} \right). \quad (6)$$

The criterion of optimal segmentation is considered as follows: $PSNR \rightarrow \max$. Since the test image is a contour, you can determine $PSNR_{\max}$ by comparing the images with themselves. As coefficients a , b , c , d , constants 2, 0.7, 0.2 and 0.1 were used, respectively. The results of the calculations are presented in table 5.

Table 5. Numerical quality assessment

Method	<i>Pco</i>	<i>Prd</i>	<i>Pfa</i>	<i>RE</i>	<i>PSNR</i>
Reference	1	0	0	0.37	4.31
BNS without predictor	1	0	0	0.37	4.31
BNS with predictor	1	0	0	0.37	4.31
Operator Canny	0.09	0.29	0.91	0.70	1.57
Operator Kirsha	0.28	0	0.72	0.60	2.21
Laplacean 5x5	0	0.20	1	0.72	1.42

From the table 5 it is visible that thanks to the property of allocation of a single line of a contour, and that the given image was initially created in digital form, method BNS in both cases has shown 100 % allocation of all lines of a contour.

Evaluation of time costs. To estimate time consumption of algorithms execution, a test image of 4140x5520 pixels was taken. The test results are presented in table 6. Testing shows that the least resource-intensive method is BNS, and the use of the predictor speeds up the execution of the main algorithm.

Table 6. Algorithm runtime

Method	Duration(ms)
Operator Canny	240
BNS method without predictor	46
BNS method with predictor	33
Operator Kirsha	71
Operator Laplacean	71

Conclusion. In the course of the research, known image processing algorithms were tested. Since the results of most of these algorithms did not meet the established criteria, were proposed empirical algorithms that can achieve the necessary results in the output image. As testing has shown, the proposed algorithms effectively cope with photos, with images with a low threshold of light sensitivity (test 2) and images that do not have a gradient (contour image), while maintaining the numerical evaluation criteria.

The proposed algorithm has some advantages over other algorithms, such as higher peak signal-to-noise ratio and high computational speed. Therefore, it can be applied in systems with low processor power without reducing the speed of filtering contaminated, low contrast of identification numbers on wagon images.

REFERENCES LIST

1. Regularized evolution for image classifier architecture search / E. Real, A. Aggarwal, Y. Huang, Q. V. Le // AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2018. – 16 p. – DOI 10.1609/aaai.v33i01.33014780.
2. A unified multi-scale deep convolutional neural network for fast object detection / Z. Cai, Q. Fan, R. S. Feris, N. Vasconcelos // European Conference on Computer Vision. – 2016. – P. 354–370. – DOI 10.1007/978-3-319-46493-0_22.
3. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation / L. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou [et al.] // European Conference on Computer Vision. – 2018. – 18 p. – DOI 10.1007/978-3-030-01234-2_49.

4. Elfving, S. Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning / S. Elfving, E. Uchibe, K. Doya // Neural Networks. – 2017. – №107. – P. 3–11. – DOI 10.1016/j.neunet.2017.12.012.
5. Megdet: A large mini-batch object detector / C. Peng, T. Xiao, Z. Li [et al.] // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 6181-6189. – DOI 10.1109/CVPR.2018.00647.
6. Islam, M. A. Gated feedback refinement network for dense image labeling / M.A. Islam, M. Roohan, N.D. Bruce, Y. Wang // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2017. – P. 4877-4885. – DOI 10.1109/CVPR.2017.518.
7. Ramachandran, P. Searching for Activation Functions / P. Ramachandran, B. Zoph, Q. V. Le. // ArXiv: 1710.05941. – 2018. – DOI 10.48550/arXiv.1710.05941.
8. Redmon, J. Yolov3: An incremental improvement / J. Redmon, A. Farhadi // ArXiv: 1804.02767. – 2018. – DOI 10.48550/arXiv.1804.02767.
9. Jonathan, P. Yolo-lite: a real-time object detection algorithm optimized for non-gpu computers / J. Pedoem, R. Huang // 2018 IEEE International Conference on Big Data. – 2018. – P. 2503-2510. – DOI 10.1109/BigData.2018.8621865.

Поступила в редакцию 26.12.2023 г., рекомендована к печати 30.01.2024 г.

МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ НУЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Мухамедиева Д.К., Мухамедиева К.Б., Бозорбоев Ж.У.

В статье сформулирована задача предварительной обработки изображений сцены для идентификации конкретных объектов - маршрутных номеров транспортных средств на цветных изображениях, полученных при съемке на фотоаппараты. В качестве доступных скоростных методов предварительной обработки рассматривается метод Otsu - метод получения оптимального приближения полутонового (серого) изображения, а также ряд стандартных методов локальной обработки в скользящем окне. Авторы предлагают два эвристических метода предварительной обработки: неадаптивное преобразование цветного изображения в серое (предиктор резкости); метод размытия серого изображения (метод BNS - размытие оттенков соседней), используемый для выделения контуров на изображении. На тестовых изображениях показан эффект от применения различных методов для выделения контуров и локализации области расположения маршрутного номера автомобиля на изображениях. Методы также сравниваются на других данных - цветных фотографиях и трехцветном картографическом изображении 1100 данных с размером 32x32 пикселя.

Ключевые слова: выделение контуров, преобразование пикселей, локализация объектов, функция Otsu.

Мухамедиева Дилдора Кабуловна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения информационных технологий Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми, Узбекистан, г. Ташкент.

Mukhamedieva Dildora Kabulovna

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Department of Information Technology Software of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorazmiy, Uzbekistan, Tashkent.

Мухамедиева Кибриё Бахадировна

соискатель кафедры информационных технологий Ташкентского университета прикладных наук, Узбекистан, г. Ташкент.
E-mail: mkb78@mail.ru

Mukhamadieva Kibrie Bakhadirovna

Applicant at Department of Information Technologies of Tashkent University of Applied Sciences, Uzbekistan, Tashkent.

Бозорбоев Жавлон Уткирбой угли

студент кафедры компьютерного инжиниринга Ташкентского университета прикладных наук, Узбекистан, г. Ташкент.
E-mail: bjavlon@gmail.com

Bozorboev Javlon Utkirboy ugli

Student at Department of Computer Engineering of Tashkent University of Applied Sciences, Uzbekistan, Tashkent.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСНИ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2024 *Третьяков И.А., Данилов В.В., Ступак В.А.*

В данной работе приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиообстановки на основе фотонного эхо-эффекта. Показано, что комбинирование оптических и радиотехнических методов обработки информации позволяет существенно расширить возможности по обработке информации в радиосигналах. Рассмотрен функциональный блок автоматизированной системы акустооптоэлектронного анализа спектра.

Ключевые слова: обработка радиосигналов, оптические методы, АСНИ, радиообстановка, эхо-эффект, спиновое эхо, фотонное эхо, эхо-процессор.

Введение. Важнейшим элементом современной концепции защиты информации является контроль радиообстановки - обнаружение, идентификация, локализация и изучение источников электромагнитного излучения в рамках контролируемого объекта. Кроме того, широко известна проблема информационной безопасности электромагнитных излучений и наводок в средствах вычислительной техники [1, 2]. Однако, контроль и прогнозирование таких сложных процессов по многочисленности и разнообразию вычислений, а также ежедневно увеличивающемуся объему исследуемых данных и способах их получения, невозможны без создания специализированных автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) [3-6]. Широкие перспективы создания устройств оптимальной обработки радиосигналов для таких АСНИ связаны с применением таких физических явлений, как эхо-эффект. Так, в работах авторами [7-11] были исследованы функциональные блоки АСНИ и элементы вычислительной техники (эхо-процессоры) на основе таких эхо-эффектов как спиновое [7-10] и фоновое [11]. Данная статья является продолжением этих исследований в части применения в АСНИ другого типа эхо-эффекта – фотонного (светового).

К открытию явления фотонного эха, являющегося по сути нелинейными запаздывающими когерентными откликами резонансной среды на воздействие определенных последовательностей возбуждающих когерентных (лазерных) импульсов, привели исследования отечественных и зарубежных ученых [12, 13]. Так, световое эхо, впервые наблюдавшееся в рубине, оказалось новым мощным методом оптической когерентной спектроскопии, актуальным и в настоящее время.

Длины волн оптических возбуждающих импульсов на несколько порядков меньше линейных размеров резонансной среды. Таким образом, возможности обработки оптических сигналов оказываются существенно более широкими, чем у соответствующих аналогов – радио- и акустических сигналов (т.е. сигналов спинового и фонового эха).

Исследование проводилось в рамках научной з/б темы «Исследование природы каналов побочных электромагнитных излучений и наводок элементов и устройств офисной вычислительной техники» (регистрационный номер 124012400347-2).

В настоящее время преимущественное применение в технике (в частности, в спектроскопии и эхо-голографии) нашли сигналы первичного (двухимпульсного) и стимулированного (трехимпульсного) эха, возможность обработки и хранения которых используется в таких элементах вычислительной техники, как оптические запоминающие устройства и эхо-процессоры. Однако, на первичном этапе развития фотонного эхо-эффекта такие перспективы не просматривались из-за очень кратковременной оптической фазовой памяти. Переломным моментом в исследованиях фотонного эхо-эффекта стало открытие долговременного стимулированного фотонного эха на длине волны возбуждающих импульсов $\lambda=0,4777$ мкм в кристалле трехфтористого лантана LaF_3 , активированного ионами трехвалентного празеодима Pr^{3+} [14, 15]. По сегодняшний день не останавливаются исследования в этой области.

Механизм образования сигналов фотонного эха. Несмотря на принципиальное различие физических явлений, происходящих при возникновении спинового, фононного и фотонного эха, между ними просматривается глубокая аналогия. В связи с чем, временная диаграмма образования сигналов фотонного эха, показанная на рис. 1, не требует особых пояснений.

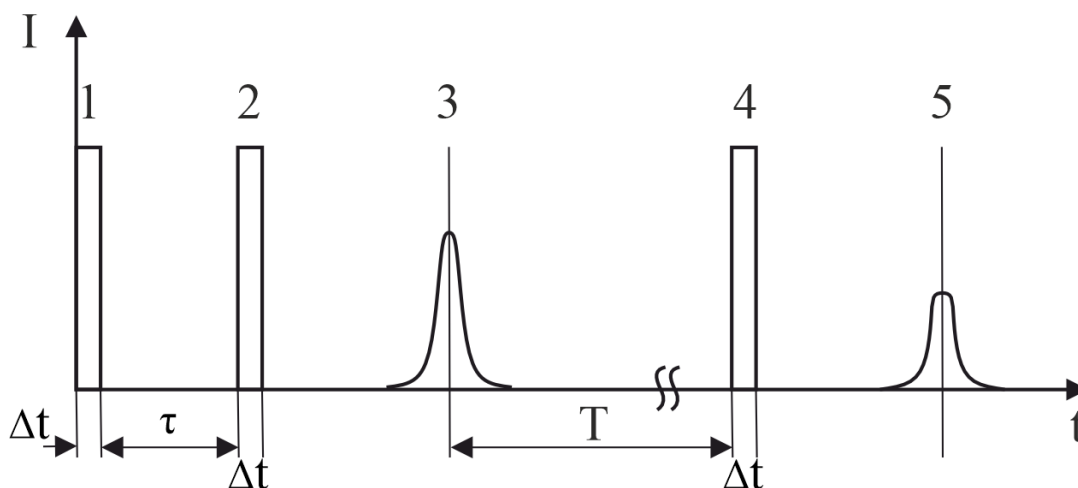


Рис. 1. Временная диаграмма образования сигналов фотонного эха:
1, 2 – записывающие (информационные) световые импульсы; 3 – двухимпульсное первичное эхо;
4 – считывающий импульс; 5 – трехимпульсное стимулированное эхо

Учитывая показанную взаимосвязь эховых и оптических методов обработки информации, можно утверждать, что обработка радиосигналов методом трехимпульсного спинового эха может быть интерпретирована в терминах голографии. Впервые возможность применения эхо-эффекта в голографии была показана в работах [16, 17], в которой предлагалось применять явление спинового эха для распознавания образов, в роли которых выступают радиочастотные сигналы. Так, явление спинового эха можно сопоставить с процессом записи и воспроизведения Фурье-голограммы. При таком способе записи регистрируется интерференция двух волн, комплексные амплитуды которых в плоскости голограммы являются Фурье-образами предмета и опорного источника. В простейшем случае, когда используется точечный опорный источник, голограмма представляет собой простую синусоидальную решетку. Аналогично этому под действием двух δ -образных импульсов продольные компоненты изохромат амплитудно модулируются по закону $\cos(\Delta\omega\tau_{12})$. Промодулированный двумя первыми импульсами спектр продольных компонент соответствует Фурье-голограмме.

Если первый (информационный) сигнал имеет сложную форму $f(t)$, то амплитуда сигнала эха, возникающего после третьего (считывающего) δ -образного импульса, будет $\sim f^*(-t)$, что в голографии соответствует восстановленному сопряженному изображению предмета. К сожалению, в отличие от голограммы, систему промодулированных изохромат нельзя закрепить и информация будет теряться с характеристическим временем спин-решеточной релаксации T_1 . Однако, с другой стороны, это позволяет записывать и хранить некоторое время различные радиочастотные сигналы последовательно в одном образце.

Рассмотрим способ моделирования простых оптических систем на основе эхо-эффекта. Распространение одномерного светового сигнала $f(x)$ в свободном пространстве описывается преобразованием [18] вида:

$$f(x^1) \sim \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \exp\left[\frac{i \cdot 2\pi(x-x^1)^2}{\lambda y^1}\right] \cdot dx,$$

где y^1 – расстояние от плоскости объекта до плоскости изображения.

Смоделировать распространение светового сигнала в свободном пространстве возможно путем подачи на спиновую систему достаточно длинного радиочастотного сигнала с квадратично меняющейся фазой, т.е. с линейно меняющейся частотой заполнения. К сожалению, за один проход сигнала через спиновую систему возможно смоделировать лишь простые оптические системы, показанные на рисунке 2 и содержащие только один участок свободного пространства.

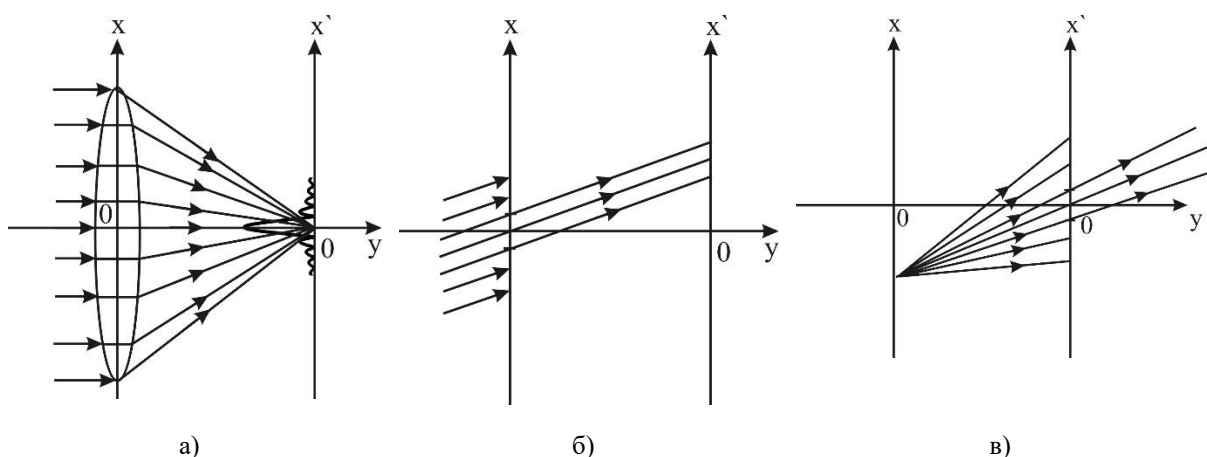


Рис. 2. Примеры простых оптических систем

Оптическая система, показанная на рисунке 2а, с точностью до квадратичного фазового множителя способна производить Фурье-преобразования входного сигнала $f(x)$ при условии, что y^1 равно фокусному расстоянию линзы [19]. Поскольку прохождение оптического сигнала $f(x)$ через линзу эквивалентно линейной частотной модуляции радиочастотного сигнала, то для получения Фурье-спектров на спиновую систему нужно подать предварительно линейно-частотно-модулированный сигнал, а затем достаточно длинный (настолько, чтобы его спектр полностью покрывал спектр промодулированного входного сигнала) прямоугольный линейно-частотно-модулированный импульс.

Если скорость изменения частоты в линейно-частотно-модулированном импульсе будет в два раза больше, чем в первом сигнале, двухимпульсное эхо будет описываться следующим образом:

$$f_2(t + 2\tau_{12}) \sim \exp\left(\frac{i \cdot A \cdot t^2}{2}\right) \cdot \bar{f}(At),$$

где A – скорость изменения частоты в первом сигнале.

Очевидно, что и трехимпульсная методика также позволяет осуществлять Фурье-преобразования входных сигналов. Таким образом, система на спиновом эхе, соответствующая оптической системе, приведенной на рис. 2б, будет преобразовывать частотный сдвиг входного сигнала во временной сдвиг сигнала эха, а система на рис. 2в – производить обратное преобразование.

Практическая реализация элементов вычислительной техники для АСНИ радиосигналов. В качестве примера практической возможности использования фотонных эхо-процессоров рассмотрим блок-схему запоминающего устройства большой емкости (10^{15} бит) и плотности записи (10^{12} бит/см³) при среднем времени записи, считывания и обращения 1 нс/бит. В основе подобного элемента лежит использование явления стимулированного фотонного эха в кристалле трехфтористого лантана LaF₃, активированного ионами трехвалентного празеодима Pr³⁺ [14, 15]. Для записи бита информации используются два следующих друг за другом через малое время τ (порядка нескольких нс) световых (информационных) импульса (рис. 1) длительностью $\Delta t < \tau$ с волновыми векторами, направленными под углом друг к другу и пересекающимися в заданной ячейке оптической памяти объемом около 1 мкм³. Третий (считывающий) импульс, следующий через время $T \gg \tau$ после первого, вызывает появление в момент времени $T + \tau$ сигнала стимулированного фотонного эха, несущего информацию о проведенной ранее в соответствующей ячейке записи информации. Блок-схема такого элемента вычислительной техники, в которой порядок воздействия возбуждающих лазерных импульсов и моменты генерации эхо-сигналов реализованы согласно диаграммы (рис. 1), приведена на рисунке 3.

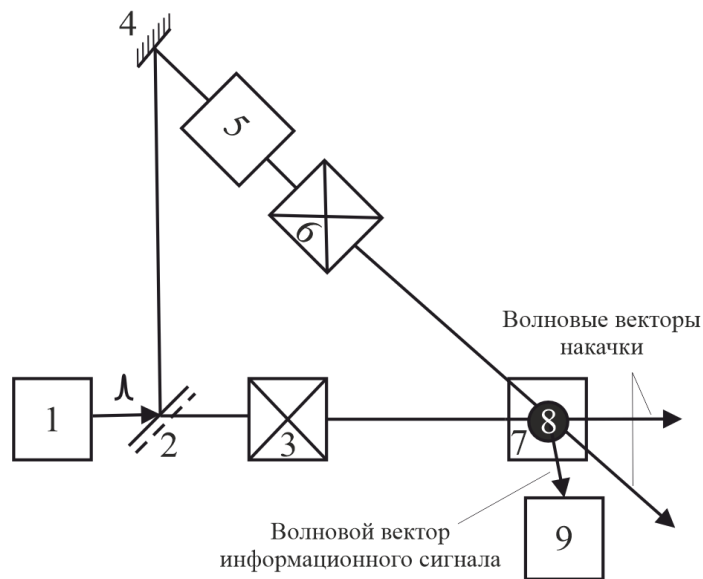


Рис. 3. Блок-схема запоминающего устройства на основе фотонного эхо

Так, как предлагаемое запоминающее устройство на фотонном эхо-процессоре предназначено для хранения информации до 5 минут, для перезаписи 10^{15} бит информации с временем обновления около 3 нс/бит потребуется 10^4 лазеров. Таким образом, блок-схема вычислительного устройства, приведенная на рисунке 3, включает в себя матрицу из 100×100 лазерных диодов – 1, делитель луча – 2, систему отклонения лучей электрооптического типа – 3 (обеспечивает наведение пересекающихся лучей в любую из 10^{15} ячеек памяти с точностью 0,1 мкм и фокусировку в объеме около 1 мкм^3), зеркало – 4, линию задержки – 5, оптический затвор – 6, охлаждаемый (3 К) неструктурированный кристалл LaF_3 с примесью Pr^{3+} в качестве хранителя информации объемом 1 дм^3 – 7, ячейку памяти – 8, фотоприемную матрицу – 9.

При практической реализации таких устройств существуют определенные трудности, такие как осуществление точной адресации лучей (до 0,1 мкм,) в любую ячейку объемом 1 мкм^3 , необходимость повышения надежности и снижения габаритных размеров. Однако, имеется и ряд существенных преимуществ, например: исключительно высокие плотности записи (10^{12} бит/см³) за счет использования неструктурированного носителя информации, позволяющего производить запись в объеме рабочего тела; отсутствие электрических соединений между элементами; возможность произвольной выборки информации; относительно малое энергопотребление для хранения и перезаписи информации; возможность быстрого стирания записанной информации; отсутствие необходимости в высокопрецизионной технологии (как при производстве полупроводниковых схем).

Для моделирования более сложных вычислительных и автоматизированных систем на основе эхо-эффекта необходимо их комбинирование с классическими радиотехническими средствами, что может существенно расширить возможности по обработке информации в радиосигналах. В качестве примера такого удачного сочетания рассмотрим функциональный блок автоматизированной системы акустооптоэлектронного анализа спектра, структура аппаратных средств которого приведена на рис. 4.

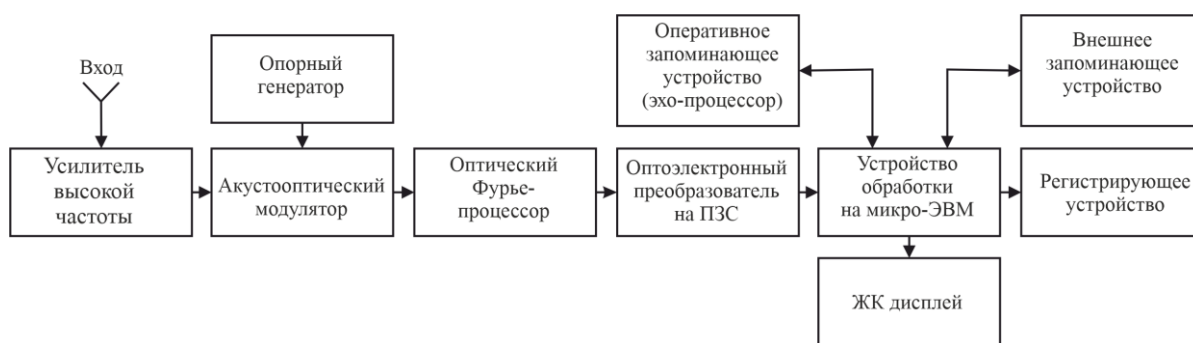


Рис. 4. Функциональный блок автоматизированной системы акустооптоэлектронного анализа спектра

Анализируемый сигнал через усилитель высокой частоты поступает на оптический Фурье-процессор. Для сопряжения радио- и оптического диапазонов используется акустооптический модулятор, выполненный, например на ПАВ [20, 21]. Для обратного преобразования оптических сигналов в электрические используется оптоэлектронный преобразователь на ПЗС. Устройство обработки электрических сигналов основано на микро-ЭВМ, быстродействующее оперативное запоминающее устройство которого выполнено на оптическом эхо-процессоре (рис. 3). Для долговременного хранения результатов обработки используется внешнее запоминающее устройство.

Итоговые результаты могут отображаться на жидкокристаллическом индикаторе и передаваться на внешнее регистрирующее устройство. Основным достоинством представленного функционального блока автоматизированной системы акустооптоэлектронного анализа спектра является его высокое быстродействие и широкополосность, полученные посредством оптимального сочетания оптических и радиотехнических методов обработки информации.

Выводы. Таким образом, не смотря на сложность протекающих физических процессов, комбинирование элементов на фотонном эхо-эффекте и классических радиотехнических средств, а также оптимальное сочетание оптических и радиотехнических методов обработки информации показывает перспективность их использования в автоматизированных системах обработки радиосигналов, в автоматизированных системах контроля радиообстановки (радиомониторинг, радиолокация, радиоидентификация, радиоразведка), информационно-измерительных системах и других смежных областях.

Кроме того, такие решения находят применение в сфере информационной безопасности при кодировании информации [22, 23], в области квантовой информационной теории [24, 25], в области машинного обучения и нейронных сетей [26, 27].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Проблемы защиты объектов вычислительной техники от утечки информации по каналам побочных электромагнитных излучений и наводок в современных условиях / Е. М. Панченко, В. В. Каверин, В. А. Бабанских, Д. В. Суздальев // Известия ТРТУ. – 2003. – № 4(33). – С. 112-113. – EDN KVNQXH.
2. Третьяков, И. А. Проблемы информационной безопасности электромагнитных излучений и наводок в средствах вычислительной техники / И. А. Третьяков, Я. И. Русечников // Информационные системы и технологии : материалы международного научного конгресса по информатике. В 3 ч. (Минск, 27–28 октября 2022 г.). – Ч. 1. – Минск: БГУ, 2022. – С. 108-112. – EDN GTKGIM.
3. Семенова, И. И. Концепция автоматизированной системы поддержки научных исследований / И. И. Семенова, А. А. Швებель // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 4. – С. 93-97. – EDN LMBSQL.
4. Снежко, В. Л. Разработка системы автоматизации экспериментальных исследований / В. Л. Снежко, М. С. Паливец, А. В. Подобный // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 10-2(73). – С. 118-120. – DOI 10.24412/2500-1000-2022-10-2-118-120. – EDN ZUWLLM.
5. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PNCERN.
6. Третьяков, И. А. Рекомендации по выбору критериев оптимальности и эквивалентности скрытых марковских моделей для АСНИ радиосигналов / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 41-45. – EDN UWZMCR.
7. Ковалевский, М. М. Об анализе спектров сигналов в спиновых эхо-процессорах в реальном времени / М. М. Ковалевский, О. В. Соколов // Вестник Новгородского государственного университета. – 2012. – № 68. – С. 37-40. – EDN QAQCAP.
8. Баруздин, С. А. Задержка шумового радиопульса методом спинового эха / С. А. Баруздин // Colloquium-Journal. – 2019. – № 10-2(34). – С. 215-219. – EDN WTKQTH.
9. Третьяков, И. А. Обработка радиочастотных сигналов устройствами на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 28-33. – EDN JYWGQO.
10. Третьяков, И. А. Спектральный анализ радиосигналов в реальном времени на основе применения эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 1. – С. 53-59. – DOI 10.24143/2072-9502-2022-1-53-59. – EDN QIFWWI.

11. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
12. Копвиллем, У. Х. Световое эхо на парамагнитных кристаллах / У. Х. Копвиллем, В. Р. Нагибаров // Физика металлов и металловедение. – 1963. – Т. 15, № 2. – С. 313-315. – EDN ZAZUPB.
13. Abella, I. D. Photon echoes / I. D. Abella, N. A. Kurnit, S. R. Hartmann // Physical Review. – 1966. – V 141. – № 1. – P. 391-406. – DOI 10.1103/PhysRev.141.391.
14. Chen, Y. C. Photon echo relaxation in $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ / Y. C. Chen, K. P. Chiang, S. R. Hartmann // Optics Communications. – 1979. – V.29. – №2. – P.181-185. – DOI 10.1016/0030-4018(79)90012-9.
15. Morsink, J. B. W. Photon echoes in the $^3\text{P}_0 - ^3\text{H}_3$ transition in $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ / J. B. W. Morsink, D. A. Wiersma // Chemical Physics Letters. – 1979. – V.65. – №1. – P.105-108. – DOI 10.1016/0009-2614(79)80137-2.
16. Денисюк, Ю. Н. Образы внешнего мира / Ю. Н. Денисюк // Природа. – 1971. – № 2. – С. 2-14.
17. Сороко, Л. М. От линзы – к запрограммированному оптическому рельефу / Л. М. Сороко // Природа. – 1971. – № 5. – С. 50-61.
18. Сороко, Л. М. Основы голографии и когерентной оптики / Л. М. Сороко. – Москва: Наука, 1971. – 616 с.
19. Papoulis, A. Systems and transforms with applications in optics / A. Papoulis. – New York: McGraw-Hill, 1968. – 474 p.
20. Яновский, А. В. Структуры автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн / А. В. Яновский, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 46-53. – EDN FOBKIO.
21. Третьяков, И. А. Методика исследования акустооптического элемента спектрального уплотнения-разуплотнения потоков данных автоматизированных систем / И. А. Третьяков, А. В. Шалаев, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 24-30. – EDN XCOFET.
22. Русанова, И. А. Кодирование информации возбуждающих лазерных импульсов в оптическом эхо-процессоре / И. А. Русанова // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 7. – С. 651-655. – EDN TTFRNV.
23. Управление информационной свёрткой кодированных импульсов при обработке изображений / А. П. Ефимкин, М. А. Кушхабиева, Р. В. Маремшаов, Л. С. Ажахова // Актуальные аспекты развития науки и общества в эпоху цифровой трансформации : сборник материалов v международной научно-практической конференции (шифр -МКАА), Москва, 27 февраля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2023. – С. 108-112. – EDN RTCLJD.
24. Нефедьев, Л. А. Фазовые информационные процессы в эхо-голографии / Л. А. Нефедьев, О. Р. Шмындина // Вестник Казанского государственного педагогического университета. – 2006. – № 3(7). – С. 31-38. – EDN JVTJQZ.
25. Гарнаева, Г. И. Алгоритмы преобразования информации в эхо-голографии / Г. И. Гарнаева, Л. А. Нефедьев, Э. И. Хакимзянова // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 4. – С. 620-626. – EDN ХТКХWX.
26. Воробьева, В.Е. Использование модели Хопфилда-Литтла для создания процессоров нового типа / В. Е. Воробьева // Материалы IV международной научной школы «Наука и инновации – 2009» (Йошкар-Ола, 18-24 августа 2009 г.). – Йошкар-Ола: МарГУ, 2009. – 60-66.
27. Оптическая нейронная сеть на основе синтетических фотонных решеток / А. В. Паньков, И. Д. Ватник, Д. В. Чуркин, А. А. Сухоруков // 9й Международный семинар по волоконным лазерам : Материалы Международного семинара по волоконным лазерам 2020, Новосибирск, 20–24 сентября 2020 года. – Новосибирск: Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 2020. – С. 130-131. – DOI 10.31868/RFL2020.130-131. – EDN GXZUQV.

Поступила в редакцию 18.01.2024 г., рекомендована к печати 09.02.2024 г.

APPLICATION OF OPTICAL INFORMATION PROCESSING METHODS
IN ASRS OF RADIO SIGNALS

Tretiakov I.A., Danilov V.V., Stupak V.A.

This paper describes the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the photonic echo effect. It is shown that the combination of optical and radio engineering methods of information processing makes it possible to significantly expand the possibilities for processing information in radio signals. The functional block of the automated acousto-optoelectronic spectrum analysis system is considered.

Keywords: radio signal processing, optical methods, ASRS, radio substitution, echo effect, spin echo, photonic echo, echo processor.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Ступак Владимир Аврамович

старший научный сотрудник кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: v.a.s.19470415@gmail.com

Stupak Vladimir Avramovich

Senior Researcher at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ФРУКТОВ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО СБОРА УРОЖАЯ

© 2024 Мисакордзиян А.О., Нестругина Е.С.

В настоящей статье рассмотрены различные методы обнаружения и распознавания фруктов, основанные на совокупности методов глубокого машинного обучения. Данные методы являются основными методами точного, быстрого и надежного обнаружения и распознавания фруктов. Выявлены соответствующие достоинства и недостатки. Предложены решения и рекомендации для их устранения.

Ключевые слова: компьютерное зрение, глубокое обучение, обнаружение фруктов, распознавание плодов, автоматический сбор урожая.

Введение. В настоящее время значительный интерес вызывает применение методов искусственного интеллекта для автоматизации сельскохозяйственных процессов, в частности, для обнаружения, распознавания и автоматического сбора урожая, например, фруктов, для идентификации которых используются различные методы глубокого машинного обучения с применением сверточных нейронных сетей.

Исследователи могут использовать модели глубокого обучения для решения задач компьютерного зрения. Глубокое обучение – это метод машинного обучения, который фокусируется на обучении машин учиться на собственном примере. Поскольку большинство методов глубокого обучения используют архитектуру нейронных сетей, модели глубокого обучения часто называют глубокими нейронными сетями [1].

Распознавание изображений – одна из задач, в которой преуспевают глубокие нейронные сети, дающие впечатляющие результаты по идентификации фруктов из набора изображений. Нейронные сети, моделирующие аналитическую работу человеческого мозга, представляют собой вычислительные системы, предназначенные для распознавания паттернов. Их архитектура подобна структуре человеческого мозга. Они состоят из трех типов слоев: входных, скрытых и выходных. Входной уровень получает сигнал, скрытый уровень обрабатывает его, а выходной уровень принимает решение для прогноза относительно входных данных. Каждый сетевой уровень состоит из взаимосвязанных узлов (искусственных нейронов), которые выполняют вычисления. Таким образом, каждый слой состоит из нескольких нейронов. Вход для каждого из нейронов следующего слоя состоит из суммирования выходов нейронов из предыдущего слоя. Выходные данные сравниваются с целевыми значениями на основе функции стоимости. Это важно, потому что точное распознавание фруктов имеет первостепенное значение в области картирования урожайности [2].

Например, чтобы иметь возможность распознавать фрукты, система должна сначала изучить их особенности. Она должна быть обучена предсказывать, является ли объект X или Z. Использование методов глубокого машинного обучения для обнаружения, распознавания, идентификации, классификации различных видов фруктов из набора изображений, показало свое превосходство перед другими алгоритмами. Более того, глубокие нейронные сети используются в широком спектре приложений и обеспечивают оптимальные решения проблем, возникающих в различных областях, таких как анализ изображений, речь, распознавание, прогнозирование, анализ больших наборов данных и маркетинг [2].

Нейронные сети изучают объекты непосредственно на основе данных, на которых они обучаются, поэтому специалистам не нужно извлекать объекты вручную [3]. Математически нейронные сети способны изучать любую функцию отображения и, как было доказано, являются универсальными алгоритмами аппроксимации. Обучающие данные, в данном случае, представляют собой большой набор данных, содержащий множество примеров каждого класса изображений. Например, набор данных ImageNet содержит более 14 миллионов изображений с комментариями, представляющими 21841 понятий (наборы синонимов или синсеты в соответствии с иерархией WordNet), в среднем по 1000 изображений на понятие [3].

Каждое изображение снабжено комментариями (метками) с указанием категории, к которой оно относится, например, яблоко или груша. Алгоритм исследует эти примеры, узнает о визуальных характеристиках каждой категории и, в конечном счете, учится распознавать каждый класс изображений. Этот типовой стиль обучения называется контролируемым обучением [3].

Развитие машинного обучения в области искусственного интеллекта привело к значительному прогрессу в решении сельскохозяйственных задач. Благодаря своей высокой способности извлекать характеристики из изображений фруктов, глубокое обучение широко используется для обнаружения фруктов при автоматическом сборе урожая. Сверточные нейронные сети продемонстрировали способность достижения высокой точности и скорости обнаружения фруктов при автоматическом сборе урожая, по сравнению с человеческими [4].

В данной статье представлен обзор методов обнаружения и распознавания фруктов из совокупности методов глубокого машинного обучения. Однако, вопрос распознавания фруктов полностью еще не решен. Следует рассматривать сходство по размеру, форме и другим характеристикам [4].

Постановка задачи. Целью данной работы является сравнение существующих методов обнаружения и распознавания фруктов с использованием глубоких нейронных сетей, выявление соответствующих достоинств и недостатков для выбора наилучшего, позволяющего использовать его в разработке алгоритмов обнаружения и распознавания фруктов на основе методов глубокого машинного обучения для автоматического сбора урожая.

Обзор методов глубокого машинного обучения для автоматизации сельскохозяйственных процессов. Применение глубоких сверточных нейронных сетей в системах машинного зрения, использование интеллектуальных роботов для уборки урожая фруктов и овощей позволяет значительно уменьшить количество тяжелых ручных операций по сбору урожая, повысить производительность труда, существенно снизить потери урожая [5].

Существует множество примеров применения роботизированных систем с применением искусственного интеллекта и компьютерного зрения, других передовых методов контроля в различных областях сельского хозяйства, таких как распознавание урожая, подсчет плодов, распознавание сорняков и обнаружение болезней растений. Например, Рехман Т.У. и другие исследователи из Америки и Канады представили исчерпывающее резюме алгоритмов машинного обучения, которые использовались в различных сельскохозяйственных работах [5].

Бразильские исследователи Патрисио Д.И. и Ридер Р. исследовали потенциальные области применения машинного зрения для различных сельскохозяйственных задач, таких как обнаружение болезней сельскохозяйственных культур и вредителей, оценка качества зерна и автоматическое фенотипирование растений [6].

Нарваэс Ф.Ю. и другие исследователи из Чили, Италии и Америки обобщили различные методы зондирования, а также их ограничения, для классификации фруктов и растений [6]. Индийский исследователь Джа К. [6] рассказал о новейших интеллектуальных методологиях для сельскохозяйственных целей. Голландские исследователи Вольферт С. и другие [7] рассмотрели применение больших данных в сельском хозяйстве. Были рассмотрены методы обнаружения и распознавания фруктов, основанные на цифровой обработке изображений и традиционном машинном обучении для комбайнов для уборки плодов [8].

Новозеландские исследователи Салим М.Х. и другие [9] обобщили и объяснили модели глубокого обучения для идентификации и классификации болезней растений, наряду с применением глубокого обучения, с использованием передовых методов визуализации, включая гиперспектральную и мультиспектральную визуализацию. Ванг Д. и другие американские и израильские исследователи [10], а также китайский исследователь Ванг А. [11] рассмотрели процедуры обнаружения сорняков с использованием различных методов классификации, включая машинное обучение и глубокое обучение. Применение искусственного интеллекта с использованием компьютерного зрения, глубокого машинного обучения, машинного зрения и других передовых методов визуального контроля в сельском хозяйстве, например, автоматической уборки урожая, очень широко и многообразно [12-18].

Однако, данная статья сосредоточена на использовании глубокого обучения, применяемого для распознавания изображений фруктов, главным образом, в областях обнаружения и классификации для автоматического сбора урожая.

Обнаружение и распознавание фруктов на основе методов глубокого машинного обучения. Прототипы первых роботов для сбора фруктов начали разрабатываться в конце шестидесятых годов прошлого века. Однако, практическое использование их было затруднено из-за высокой себестоимости производства. При этом, скорость сбора плодов была очень низкой, а доля несобранных плодов высокой в связи с недостаточным качеством систем машинного зрения [19]. Концепция глубокого обучения возникла в результате исследований искусственных нейронных сетей, предложенных канадскими исследователями Хинтоном Г.Э. и Салахутдиновым Р.Р. в 2006 году [19]. Поскольку глубокое обучение обладает мощной способностью извлекать из изображений фруктов крупномасштабные характеристики, многие исследователи провели обширные и углубленные исследования по обнаружению и распознаванию фруктов на основе глубокого обучения для автоматического сбора урожая [20].

Свёрточные нейронные сети были предложены американским исследователем Лекуни и другими [21, 22] в 1980-х годах. Они могут эффективно определять закономерности в многомерном пространстве. Типичная структура свёрточной нейросети для обнаружения и распознавания фруктов показана на рисунке 1. Она включает в себя свёрточный слой (Conv), объединяющий уровень (Pool), нелинейную функцию активации и полностью подключенный уровень (FC). Свёрточный слой является ядром свёрточной нейросети для определения признаков фруктов. В зависимости от разработанного ядра свертки, операции свертки фиксируют контуры изображения фруктов и генерирует соответствующие карты характеристик фруктов. Чтобы уменьшить пространственный размер карт признаков фруктов, объединяющий слой выполняет операции понижающей дискретизации путем выборки максимального или среднего значения в соседнем диапазоне. Нелинейная функция активации использует функции активации для обработки входных данных. Нейроны полносвязного слоя связаны со всеми активированными нейронами в слое над ним [23].

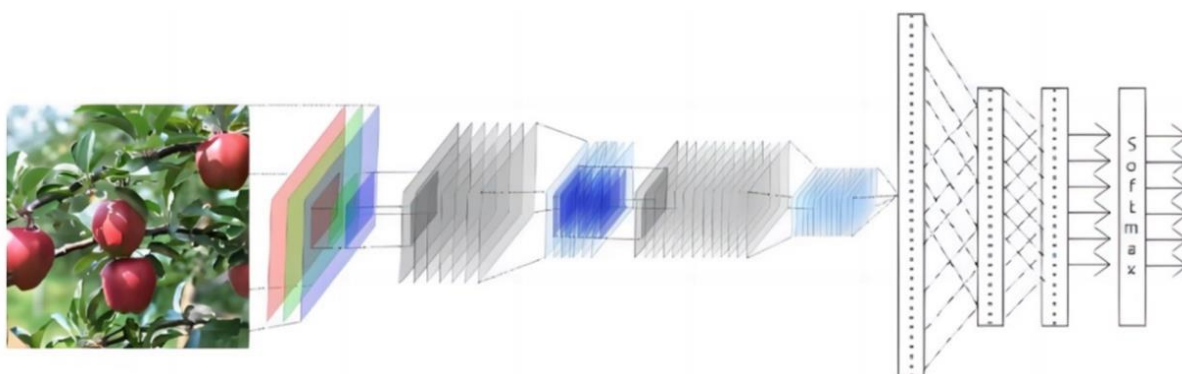


Рис. 1. Типичный фреймворк сверточной нейросети для обнаружения и распознавания фруктов

При обучении сверточных нейронных сетей модель оценивает категории прогнозируемых изображений, вычисляет потери при обучении, используя выбранные функции потерь, и обновляет веса с помощью функций обратного распространения и градиентного спуска. Функция потерь при перекрестной энтропии является одной из наиболее широко используемых функций потерь, а метод стохастического градиентного спуска является наиболее популярным методом решения проблемы градиентного спуска. По сравнению с цифровой обработкой изображений и традиционными методами машинного обучения, методы обнаружения и распознавания фруктов, основанные на сверточных нейросетях, имеют большие преимущества с точки зрения точности. Джаханбахши А. и другие иранские исследователи и исследователи из Великобритании [24] предложили улучшенный метод применения сверточных нейронных сетей для обнаружения видимых дефектов в кислых лимонах. По сравнению с традиционными методами определения признаков плода, такими как гистограмма ориентированного градиента (HOG), локальный бинарный шаблон (LBP), метод опорных векторов (SVM), k-ближайший сосед (KNN), дерево решений и нечеткая классификация, было обнаружено, что сверточные нейросети превосходят эти методы, достигая точности в 100%. Бангладешские исследователи Сакиб С. и другие [22] предложили систему обнаружения фруктов с использованием сверточных нейронных сетей.

Современные методы обнаружения и распознавания фруктов, основанные на глубоком обучении для автоматического сбора урожая, можно разделить на две категории: одноступенчатые методы обнаружения и распознавания фруктов, такие как YOLO и SSD, и двухэтапные методы обнаружения и распознавания фруктов: AlexNet, VGGNet, ResNet, более быстрый R-CNN, FCN, SegNet и маскирующий R-CNN [24].

В целом, методы обнаружения и распознавания фруктов, основанные на сверточных нейронных сетях, позволяют достичь самой современной точности (SOTA) для обнаружения и распознавания любого типа фруктов на любом фоне.

Компьютерное зрение является популярной технологией, используемой для сбора фруктов, способное обнаруживать, распознавать (или классифицировать) и анализировать изображение. Одной из важнейших задач искусственного интеллекта, являющейся основой для решения различных задач компьютерного зрения, служит распознавание (или классификация) изображений – идентификация и добавление их к одному из нескольких predetermined различных классов. Так программное обеспечение и приложения для распознавания изображений могут определять, что изображено на картинке, и отличать один объект от другого [24].

К задачам компьютерного зрения относятся:

1. Классификация изображений с локализацией – помещение изображения в заданный класс и рисование ограничивающей рамки вокруг объекта, чтобы показать, где он расположен на изображении, как показано на рисунке 2.



Рис. 2. Классификация изображения с локализацией

2. Обнаружение объектов – категоризация нескольких различных объектов на изображении и отображение местоположения каждого из них с помощью ограничивающих рамок. Данная вариация классификации изображений с задачами локализации применима для множества объектов.

3. Объектная (семантическая) сегментация – идентификация конкретных пикселей, принадлежащих каждому объекту на изображении, вместо рисования ограничивающих рамок вокруг каждого объекта, как при обнаружении объектов.

4. Сегментация экземпляров – разъединение нескольких объектов (экземпляров), принадлежащих к одному классу [22].

За последние годы применение методов искусственного интеллекта и роботизированных систем для автоматизации сельскохозяйственных процессов вызвало значительный интерес (рис. 3). Фрукты обычно растут в сложных условиях со многими неопределенностями. Мощные системы визуального обнаружения плодов необходимы для применения интеллектуального интеллекта в сельском хозяйстве и автоматического сбора урожая. Характеристики систем визуального обнаружения фруктов в основном включают датчики изображения и визуальную информацию о фруктах [24].

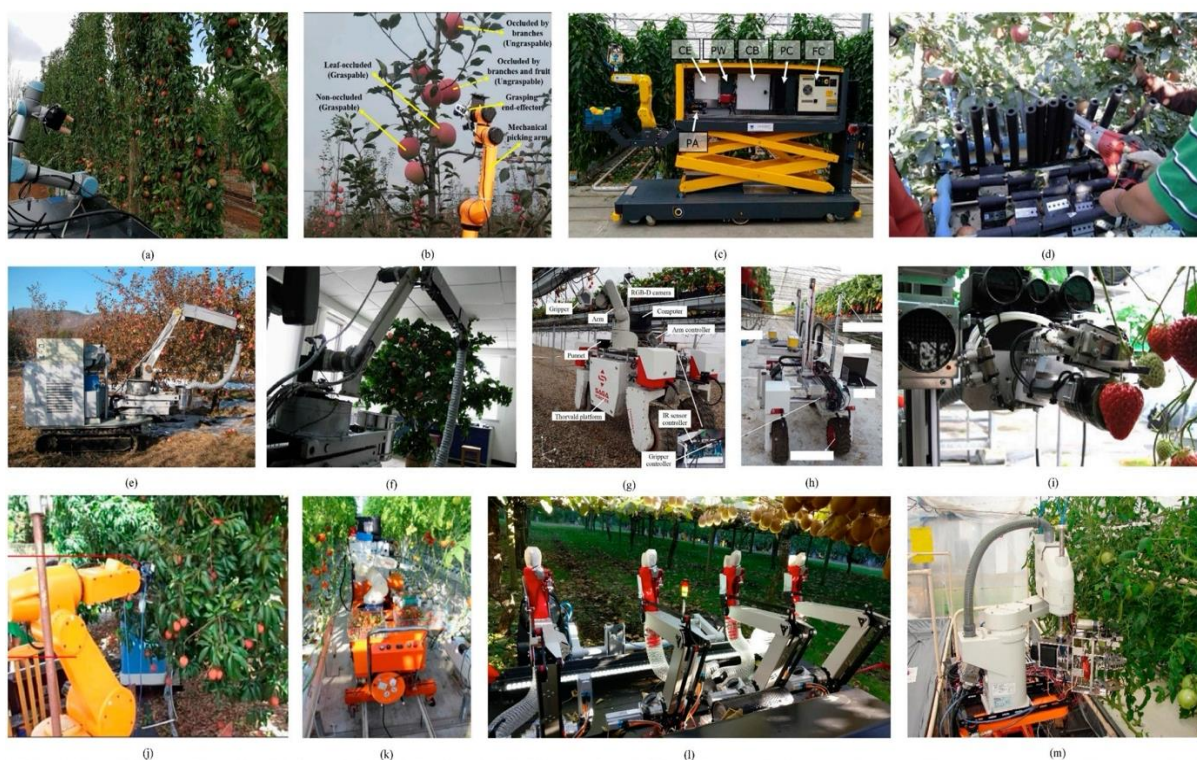


Рис. 3. Типичные уборочные роботы:

- а) робот для сбора сливы; b, d–f) роботы для сбора яблок; с) робот для сбора сладкого перца;
 g–i) роботы для сбора клубники; j) робот для сбора личи;
 k, m) роботы для сбора помидоров; l) робот для сбора киви

Системы распознавания изображений фруктов обычно работают в пять этапов, как видно из рисунка 4: получение изображений фруктов, предварительная обработка изображений фруктов, выделение признаков фруктов, сегментация изображений фруктов и распознавание изображений фруктов [24].

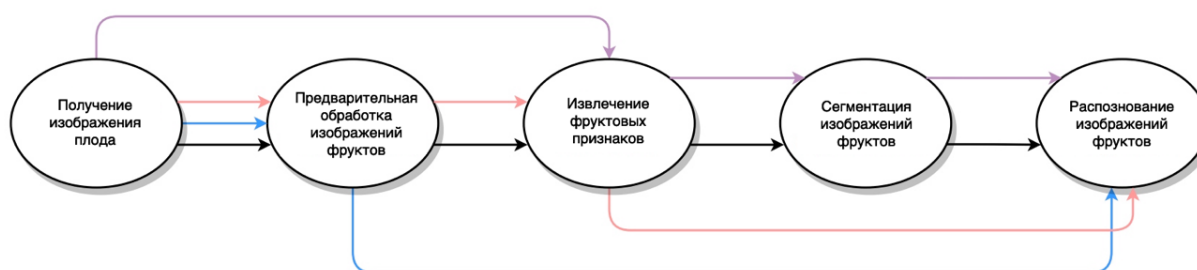


Рис. 4. Различные процессы обнаружения и распознавания фруктов на основе DL

В системах визуального обнаружения фруктов для получения информации о цвете, форме, текстуре и размере плодов в определенных зонах эксплуатации обычно используются черно-белые камеры, красно-зелено-синие (RGB) камеры, спектральные камеры, тепловизионные камеры и камеры с картой глубины RGB (RGB-D) [24].

Изображения плодов, полученные с помощью различных методов визуализации, показаны на рисунке 5.

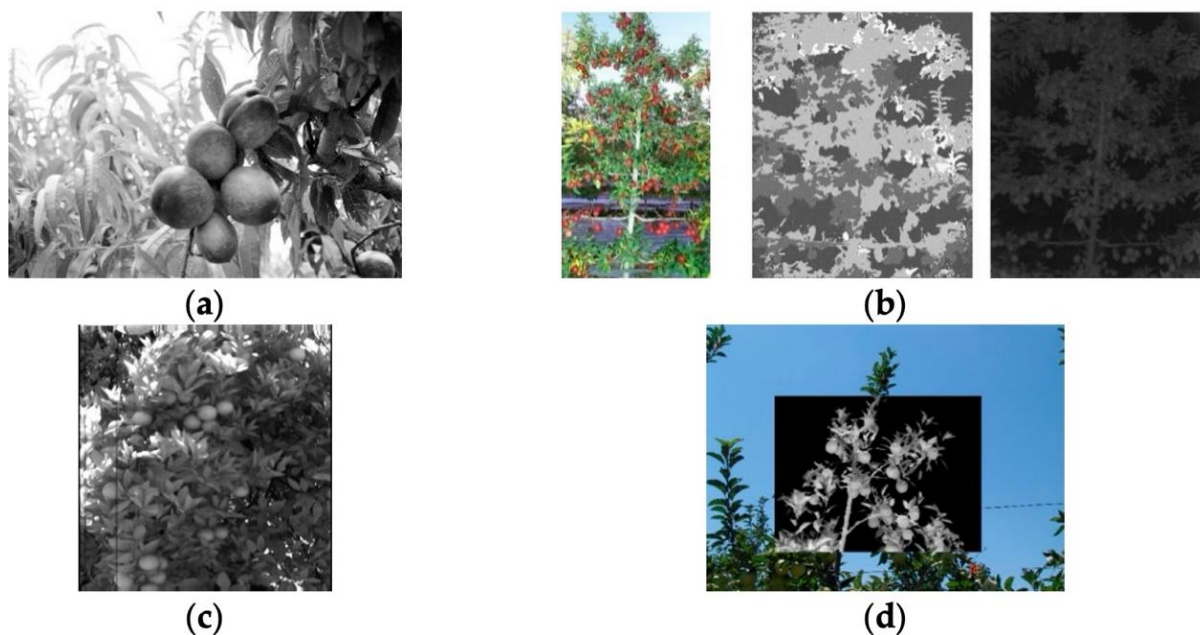


Рис. 5. Изображения, полученные с использованием различных методов визуализации: а) черно-белое изображение; б) изображения RGB, глубины и инфракрасного диапазона; в) спектральное изображение; д) цветное изображение и изображение с тепловой регистрацией

Поскольку глубокое обучение обладает высокой способностью для определения многомерных признаков на изображениях фруктов, исследователи предложили множество методов обнаружения и распознавания фруктов, основанных на глубоком обучении, сетях Алекса Крижевски (AlexNet), сетях группы визуальной геометрии (VGGNet), остаточных сетях (ResNet), более быстрых регионально-сверточных нейронных сетей [24, 25].

В 2016 г. был предложен новый алгоритм – YOLO, который предполагает однократное применение одной нейронной сети к целому изображению. Изображение разделяется на области и сразу определяет рамки объектов и вероятности отнесения к классам для каждого объекта. В 2018 г. опубликована версия алгоритма YOLOv3, в апреле 2020 г. – YOLOv4. Алгоритм обучался на наборе данных, состоящем из 123287 изображений, на которых содержится 886284 объектов, каждый из которых отнесен к одному из 80 классов (2346 бананов, 1662 яблока, 1784 апельсина и других) [25]. На данный момент алгоритм YOLO представляет собой один из самых результативных по скорости работы, вследствие чего он нашел широкое применение в сфере роботизации для сбора фруктов [25].

Несмотря на все вышеперечисленное, исследования показывают, что для создания эффективной системы визуального обнаружения плодов и сбора урожая, необходимо преодолеть множество проблем.

Выводы. В данной статье рассмотрены и проанализированы различные методы обнаружения и распознавания фруктов, основанные на глубоком машинном обучении. Данные методы являются основными методами точного, быстрого и надежного обнаружения и распознавания фруктов. Эти методы также являются важной тенденцией развития. Они относительно меньше подвержены влиянию окружающей среды. Данная работа сосредоточена на предоставлении общего обзора глубокого обучения, применяемого для распознавания изображений фруктов, главным образом, в областях обнаружения и классификации.

Для дальнейшего определения областей исследования, в данной статье были рассмотрены задачи обнаружения и классификации фруктов как определение класса на основе их конкретных типов. В целом, современные методы обнаружения и распознавания фруктов, основанные на глубоком обучении, можно разделить на следующие области: методы, основанные на YOLO, SSD, AlexNet, VGGNet, ResNet, R-CNN, FCN, SegNet и R-CNN [25].

Нехватка высококачественных наборов данных о фруктах, обнаружение небольших целевых плодов, фруктов в закрытых условиях, обнаружение нескольких видов фруктов, а также облегченные модели обнаружения фруктов являются текущими проблемами обнаружения и распознавания фруктов на основе глубокого обучения для автоматического сбора урожая. Качество и масштаб наборов данных характеристик фруктов, соответствующие стратегии улучшения и архитектура базовых моделей, все это оказывает значительное влияние на эффективность обнаружения и распознавания.

В будущих исследованиях нужно уделять приоритетное внимание решению этих текущих задач и повышению точности, скорости, надежности и универсальности систем визуального обнаружения фруктов при одновременном снижении общей сложности и стоимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Головкин, В. А. Нейроинтеллект: Теория и применения. Книга 1. Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями / В. А. Головкин. – Брест: БПИ, 1999. – 260с.
2. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – М: Высшая школа, 1984. – 208 с.
3. Сикорский, О. С. Обзор сверточных нейронных сетей для задачи классификации изображений / О. С. Сикорский // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – № 20. – С. 37–42.
4. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: пер. с англ. / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс». – 2008. – 1103 с.
5. Current and Future Applications of Statistical Machine Learning Algorithms for Agricultural Machine Vision Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Current-and-future-applications-of-statistical-for-Rehman-Mahmud/19d4ae91f0d9794c27ec93632bdfa0d7a9744524> (дата обращения 13.10.2023).
6. A graph cut algorithm for generalized image deconvolution [Электронный ресурс]. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1544836/> (дата обращения 11.10.2023).
7. Machine Learning Approach for Non-blind Image Deconvolution [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cvfoundation.org/openaccess/content_cvpr (дата обращения 13.10.2023).
8. Comprehensive Review on Automation in Agriculture Using Artificial Intelligence [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589721719300182> (дата обращения 13.10.2023).
9. Data in Smart Farming [Электронный ресурс]. – URL: https://www.econpapers.repec.org/article/eeeagisys/v_3a153_3ay_3a2017_3ai_3ac_3ap_3ab9-80.htm (дата обращения 13.10.2023).
10. Plant Disease Detection and Classification by Deep Learning [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/8/11/468> (дата обращения 13.10.2023).
11. Early Detection of Tomato Spotted Wilt Virus by Hyperspectral Imaging and Outlier Removal Auxiliary Classifier Generative Adversarial Nets [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-40066-y> (дата обращения 13.10.2023).
12. Review on Weed Detection Using Ground-Based Machine Vision and Image Processing Techniques. Comput [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331158380_A_review_on_weed_detection_using_ground-based_machine_vision_and_image_processing_techniques (дата обращения 13.10.2023).
13. Recognition of Fruits and Vegetables with Similar-Color Background in Natural Environment [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/288307456_Fruits_and_vegetables_recognition_based_on_color_and_texture_features (дата обращения 13.10.2023).
14. Advance of Target Visual Information Acquisition Technology for Fresh Fruit Robotic Harvesting [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/6/1336> (дата обращения 13.10.2023).

15. A Survey of Deep Learning Methods for Fruit and Vegetable Detection and Yield Estimation [Электронный ресурс]. – URL: <http://scholars.utp.edu.my/id/eprint/34106/> (дата обращения 13.10.2023).
16. Review on Structural Development and Recognition-Localization Methods for End-Effector of Fruit-Vegetable Picking Robots [Электронный ресурс]. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/17298806221104906> (дата обращения 13.10.2023).
17. Recognition of Bloom/Yield in Crop Images Using Deep Learning Models for Smart Agriculture [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/4/646> (дата обращения 13.10.2023).
18. Intelligent Fruit Yield Estimation for Orchards Using Deep Learning Based Semantic Segmentation Techniques [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.684328/full> (дата обращения 13.10.2023).
19. Fruits and Vegetables Quality Evaluation Using Computer Vision [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S131915781830209X> (дата обращения 13.10.2023).
20. Automation in Agriculture by Machine and Deep Learning Techniques: A Review of Recent Developments [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/352585353_Correction_to_Automation_in_Agriculture_by_Machine_and_Deep_Learning_Techniques_A_Review_of_Recent_Developments (дата обращения 13.10.2023).
21. Recognition and Localization Methods for Vision-Based Fruit Picking Robots [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00510/full> (дата обращения 13.10.2023).
22. Apple Harvesting Robot under Information Technology [Электронный ресурс]. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881420925310> (дата обращения 13.10.2023).
23. A Role of Computer Vision in Fruits and Vegetables among Various Horticulture Products of Agriculture Fields [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317318303834> (дата обращения 13.10.2023).
24. Review of Convolutional Neural Network Applied to Fruit Image Processing [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3443> (дата обращения 13.10.2023).
25. Применение сверточных нейронных сетей для обнаружения плодов роботами для сбора урожая [Электронный ресурс]. – URL: <https://masters.donntu.ru/2020/etf/mirzaliev/library/article2.htm> (дата обращения 13.10.2023).

Поступила в редакцию 13.02.2024 г., рекомендована к печати 29.02.2024 г.

FRUIT DETECTION AND RECOGNITION BASED ON DEEP MACHINE LEARNING FOR AUTOMATIC HARVESTING

Misakordziian A.O., Nestrugina E.S.

This article discusses various methods for detecting and recognizing fruits based on a set of deep machine learning methods. These methods are the main methods of accurate, fast and reliable detection and recognition of fruits. The corresponding advantages and disadvantages are identified. Solutions and recommendations for their elimination are proposed.

Keywords: computer vision, deep learning, fruit detection, fruit recognition, automatic harvesting.

Мисакордзиян Арман Ованесович

магистрант кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: kuganov.00@gmail.com

Misakordziian Arman Ovanesovich

Master student at Department of Computer
Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Нестругина Елена Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.nestrugina@donnu.ru

Nestrugina Elena Sergeevna

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor at Department of
Computer Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В
СРЕДЕ САПР КОМПАС**

© 2024 *Введенская М.И., Варакута В.В., Гридин С.В.*

В статье рассматривается возможность и актуальность интенсификации процесса этапов конструирования электродвигателя. Представлены результаты исследования способа интенсификации конструирования электродвигателей в среде САПР КОМПАС на примере процесса конструирования лифтового электродвигателя 2АНД 160 S6/180.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, САПР КОМПАС, трехмерная модель, параллельное конструирование.

Введение. Учитывая результаты анализа цивилизационного развития, выполненного ректором ФГБОУ ВО «ДОННТУ» Аноприенко А.Я. в докладе «Интеллектуализация Техносферы: Закономерности и перспективы в контексте универсальной эволюции», представленном на конференции «Методология ИИ и когнитивные исследования» ЮРО НСММИ РАН [1], на основе модернизированных нооритмов, базирующихся на циклах Чижевского и Кондратьева, можно сделать предположение, что дальнейший процесс технологического развития нашей цивилизации будет протекать по экспоненциальному закону. Поэтому современное общество становится всё более и более энергозависимым.

По прогнозам Международного центра устойчивого энергетического развития под эгидой ЮНЕСКО (МЦУЭР), к 2030 г. мировое потребление электроэнергии достигнет 33,4 трлн. кВт·ч [2]. При этом, исходя из технологических потребностей, около 65% этой энергии преобразуется электродвигателями обратно в механическую энергию. В свою очередь, при проектировании электродвигателей необходимо учитывать соответствие их технико-экономических показателей современному уровню развития техники при соблюдении требований государственных и отраслевых стандартов, а также назначение и условия эксплуатации, стоимость активных и конструктивных материалов, КПД, надежность в работе и ряд других факторов.

Если ещё в середине прошлого века потребности технологического развития могли быть удовлетворены в основном, электрическими машинами массового производства, выпускаемыми едиными сериями, которые сменялись в течение 7—12 лет, то на сегодняшний день тенденции развития угольной, нефтяной, газовой, химической и др. отраслей промышленности требуют применения электропривода с разнообразными технико-экономическими показателями. Поэтому на рынке электротехнической продукции растёт доля электродвигателей, выпускаемых малыми сериями, но с характеристиками, необходимыми конкретному заказчику. Кроме того, необходимо учитывать возможности производителей данной продукции и стремиться к максимальному снижению трудоемкости и затрат на производство электродвигателей.

Всё это приводит к значительному увеличению объёма исследовательских и проектно-конструкторских работ, которые необходимо выполнить в максимально сжатые сроки, что накладывает особые требования на степень автоматизации технологии подготовки проектов и конструкторских разработок и их реализации. В настоящее время решение этой проблемы невозможно без использования различных систем автоматизированного проектирования (САПР), особенно в области чертежно-конструкторской графики, трехмерного твердотельного моделирования и инженерных расчетов. При выборе подобных систем сдерживающим фактором является их значительная дороговизна как программного, так и аппаратного обеспечения и периферии. На территории России и стран СНГ одной из наиболее распространённых и удачных, ориентированных на интерфейс Windows, является универсальная, динамично развивающаяся, инженерная САПР среднего уровня КОМПАС компании АСКОН, разработанная специалистами военно-промышленного комплекса РФ [3]. Есть и другие факторы, влияющие на выбор той или иной САПР. Например, чертежно-графическая система КОМПАС компании АСКОН выбрана ДонНТУ для обучения студентов из тех соображений, что вуз может получить ее без оплаты стоимости лицензии, по цене только ключа защиты и комплектов документации [4].

Единая политика автоматизации, во многом утерянная после разделения крупных предприятий на мелкие составляющие, сейчас как нельзя кстати. При этом предполагается, что персонал, выполняющий проектные и конструкторские работы, обязан в совершенстве владеть автоматизированными технологиями проектирования, это должно быть необходимым требованием к его профессиональным навыкам и подготовке, особенно к навыкам коллективной работы над проектным решением, что в свою очередь является необходимым условием для успешного выполнения проектных и конструкторских работ [4]. Поэтому проблема интенсификации конструкторских работ по разработке и модернизации электродвигателей для угольной и химической промышленности (например, комбайновые электродвигатели типа ЭКВ для вновь разрабатываемого комбайна, КДК 1000), нужд городского хозяйства (например, лифтовый электродвигатель типа 2АНД 160 S6/180) в среде САПР КОМПАС на сегодняшний день является актуальной.

Постановка задачи. В данной статье рассматривается возможность интенсификации процесса этапов конструирования электродвигателя. Предполагается, что такие этапы проектирования, как расчёт размеров, параметров обмоток, рабочих и других характеристик уже завершены и их результаты представлены в габаритном чертеже и обмоточной записке (рис. 1). Целью работы является разработка и исследование способа интенсификации конструирования электродвигателей в среде САПР КОМПАС. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- уточнить структуру разрабатываемой машины;
- создать 3D–модели «Каркасов» сборочных единиц (далее каркас сборки) в соответствии со структурой;
- создать 3D–модель каркаса электродвигателя из каркасов сборок;
- создать привязочный чертёж;
- используя необходимые виды и разрезы, с помощью метода точек, создавать и уточнять эскизы разрабатываемых деталей;
- используя параллельное конструирование, дополнить все каркасы до полной сборки 3D–модели электродвигателя;
- используя стандартные методы и средства КОМПАС, разработать комплект конструкторской документации на опытный образец электродвигателя.

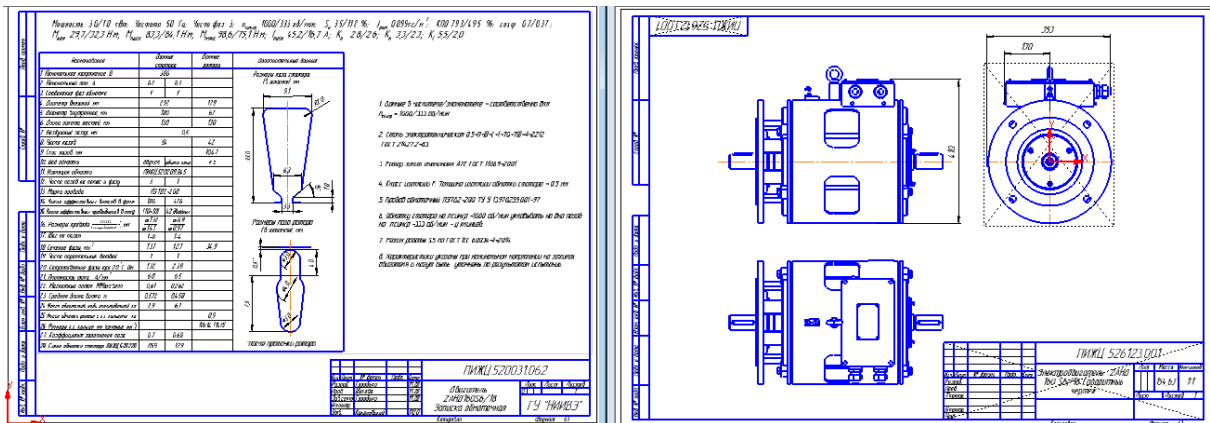


Рис. 1. Обмоточная записка и габаритный чертёж электродвигателя 2АНД 160 S6/180

Объектом исследования является процесс конструирования электродвигателя, предмет исследования - способы и методы интенсификации этапов процесса конструирования электродвигателя.

Результаты исследования. В данной работе представлены результаты исследования способа интенсификации конструирования электродвигателей в среде САПР КОМПАС на примере процесса конструирования лифтового электродвигателя 2АНД 160 S6/180.

Электродвигатель – это электрическая машина, с помощью которой электрическая энергия преобразуется в механическую для приведения в движение различных механизмов. Электродвигатель является основным элементом электропривода. В зависимости от назначения механизма, в его электроприводе, используются разные типы электродвигателей с различными параметрами, что и определяет общую структуру электродвигателя и состав конструируемых элементов, из которых он состоит.

Опорным документом при конструировании электродвигателя, является техническое задание (ТЗ), разрабатываемое проектно-конструкторской организацией - исполнителем, выполняющей все опытно-конструкторские работы по разработке электродвигателя, утверждённое в установленном порядке представителями организации заказчика. В техническом задании оговариваются все особенности конструкции разрабатываемой машины, что и определяет её структуру. В состав электрической машины, преобразующей электрическую энергию в механическую энергию вращения вала и обратно, в том или ином виде входят такие основные элементы: статор, ротор, щиты подшипниковые, коробка выводов (может входить в состав статора). Основные сборочные единицы электродвигателя 2АНД 160 S6/180 представлены на рис. 2.

Для создания каркаса сборки необходимо по данным, представленным в габаритном чертеже, обмоточной записке и ТЗ разработать 3D-модели деталей (далее деталей), соприкасающихся или взаимодействующих с деталями сопрягаемых сборок и определить их расположение относительно друг друга (рис. 3 и 4). При создании каркаса сердечника статора и каркаса ротора без вала, для экономии вычислительных ресурсов САПР пакеты жестей допускается выполнить одной деталью.

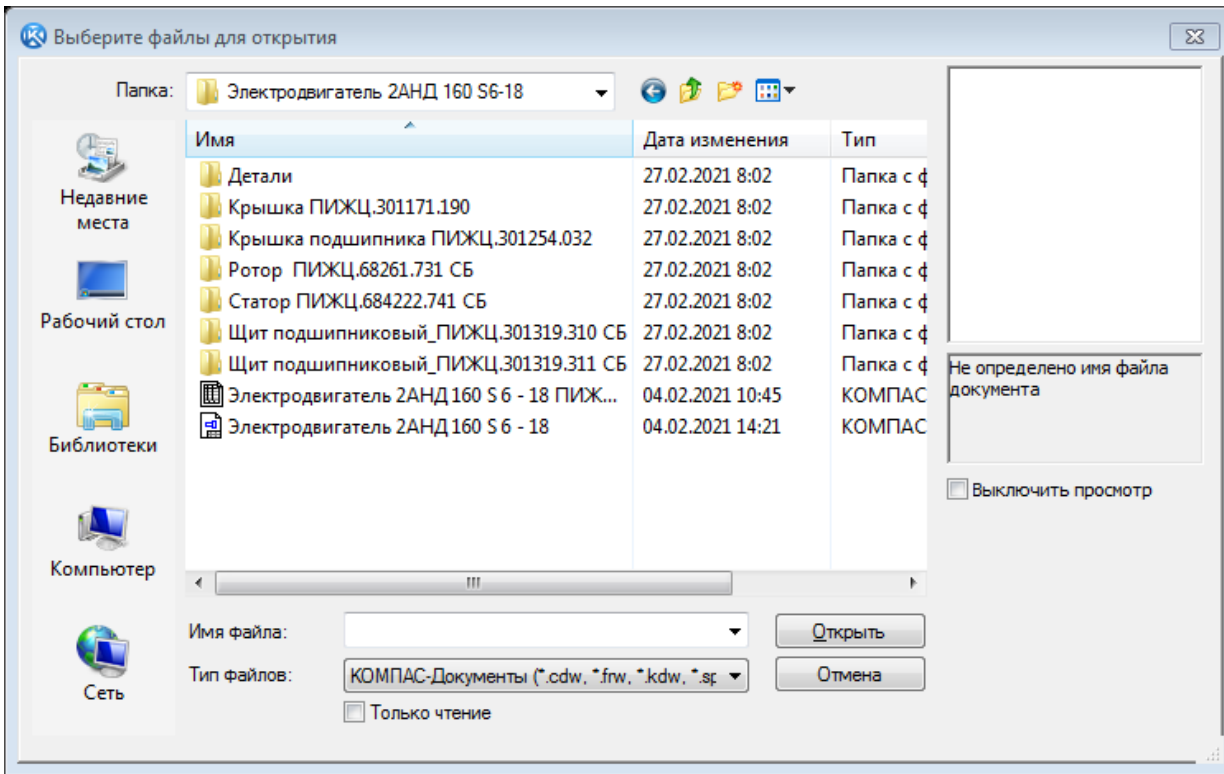


Рис. 2. Основные сборочные единицы электродвигателя 2АНД 160 S6/180 в окне САПР КОМПАС

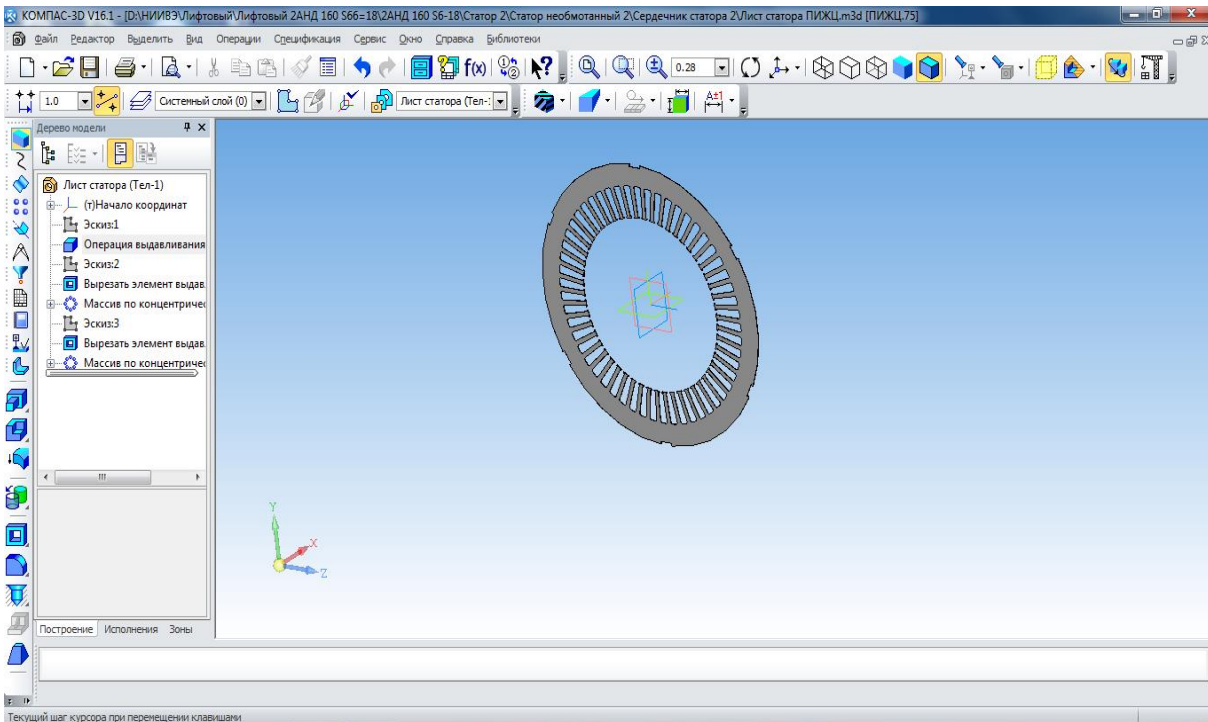


Рис. 3. Лист статор

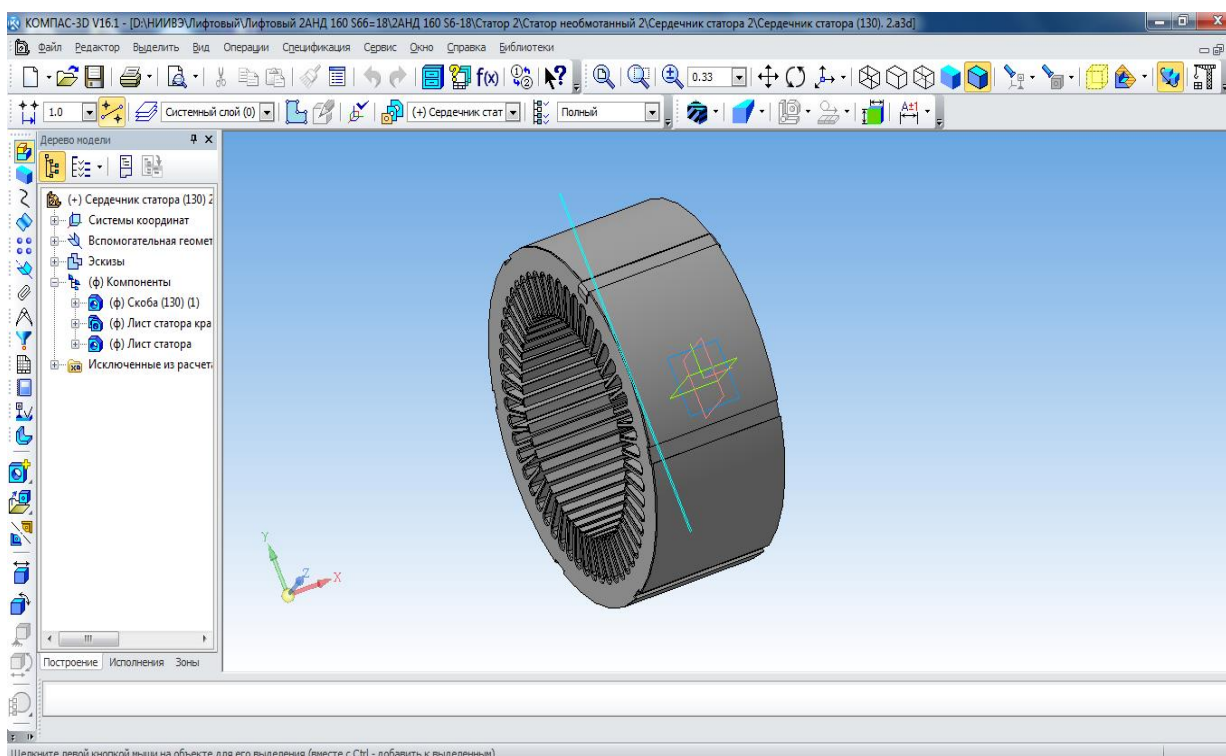


Рис. 4. Каркас сердечника статора

Полученные каркасы сборок собираем в каркас электродвигателя, уточняя и проверяя (а при необходимости и корректируя) размеры и конфигурацию каркасов сборок и разработанных деталей, в соответствии с данными представленными в габаритном чертеже, обмоточной записке и ТЗ (рис. 5).

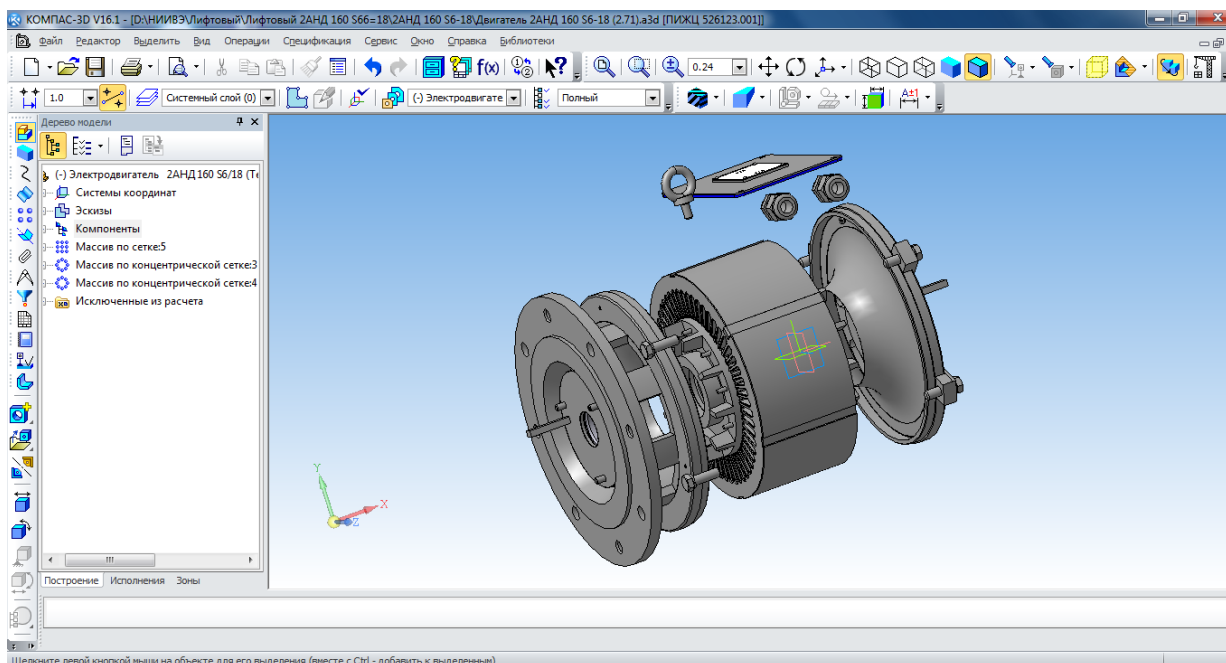


Рис. 5. Каркас электродвигателя 2АНД 160 S6/180

Привязочный чертёж – промежуточный, постоянно изменяющийся чертёж (благодаря ассоциативной связи с 3D моделью) каркаса электродвигателя в поле которого с помощью точек определяются узлы эскизов разрабатываемых деталей. Привязочный чертёж, создаём используя формат А4 в масштабе 1:1. Необходимые виды и разрезы размещаем за пределами форматки (рис. 6).

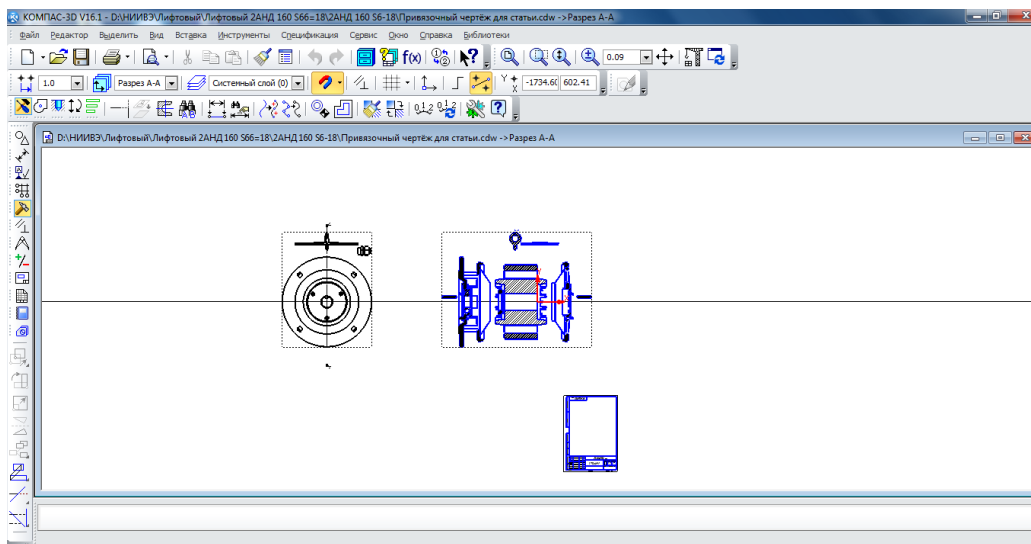


Рис. 6. Привязочный чертёж каркаса электродвигателя 2АНД 160 S6/180

В поле чертежа в привязке к сопрягаемым деталям прорисовывается фантом эскиза разрабатываемой детали. Узлы (места пересечения отрезков и кривых фантома) обозначаются точками (рис. 7). Полученные точки выделяются, переносятся на свободное поле чертежа, выделяются рамкой, копируются в буфер и переносятся в рабочее окно системы в режиме создания эскиза разрабатываемой детали (рис. 8).

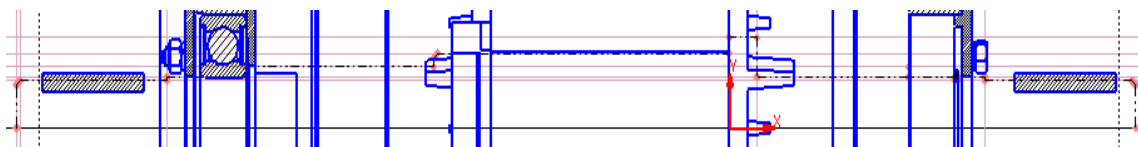


Рис. 7. Фантом эскиза с точками в узлах

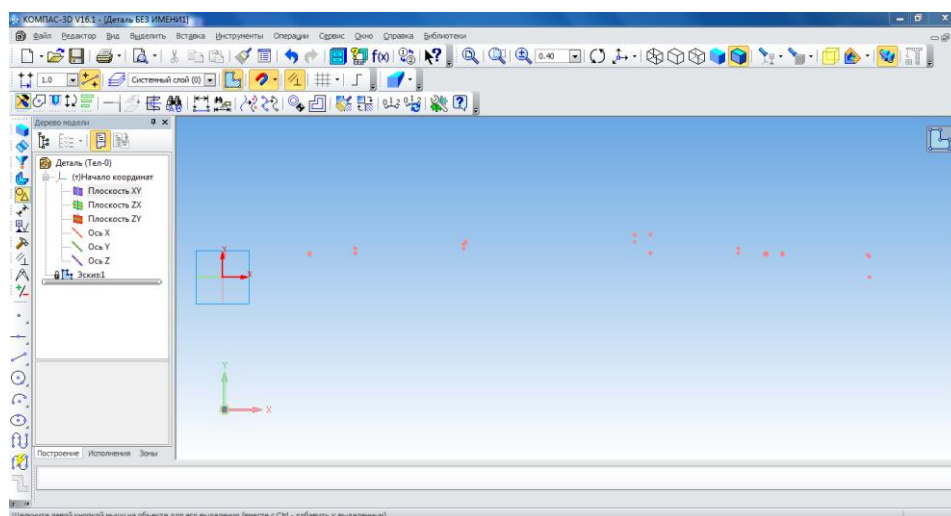


Рис. 8. Рабочее окно системы в режиме создания эскиза детали с перенесенными точками

- По этим точкам строится эскиз детали. Нужно следить за тем, чтобы:
- контуры в эскизе не пересекались и не имели общих точек;
 - контур в эскизе изображался основной линией (рис. 9).

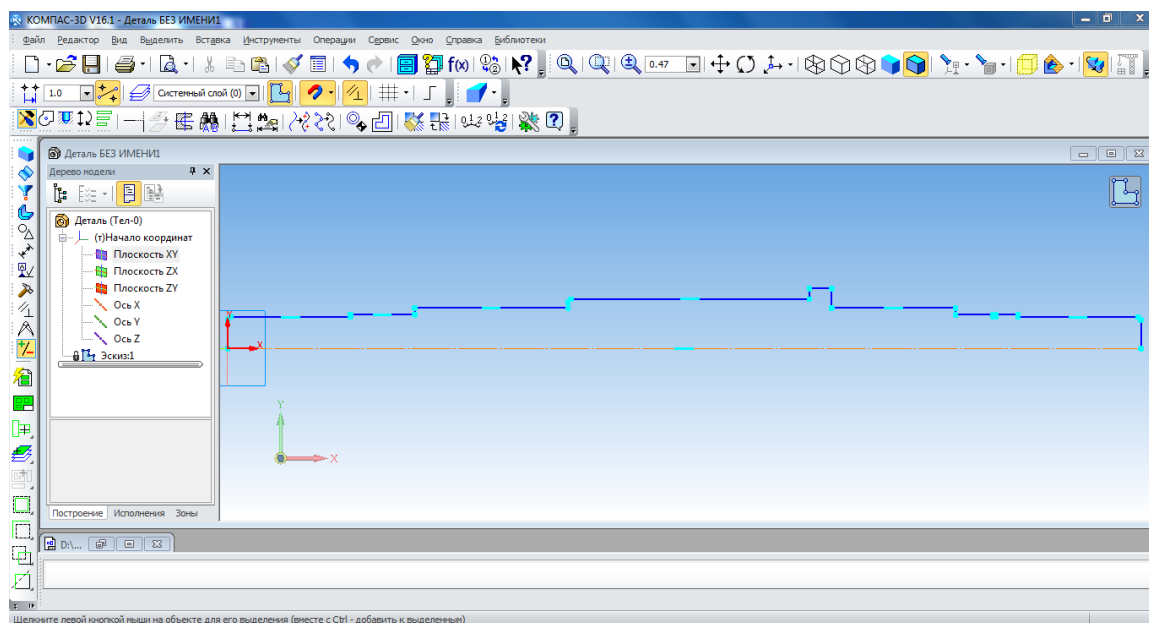


Рис. 9. Эскиз разрабатываемой детали

Метод точек подходит для разработки эскиза независимо от способа создания детали. После создания детали фантом эскиза и точки в его узлах удаляются из привязочного чертежа. Деталь добавляется в сборку, выполняется сохранение изменений во всех сборочных единицах, вплоть до каркаса электродвигателя включительно. К созданию фантома эскиза следующей детали приступаем уже в обновлённом привязочном чертеже (рис. 10).

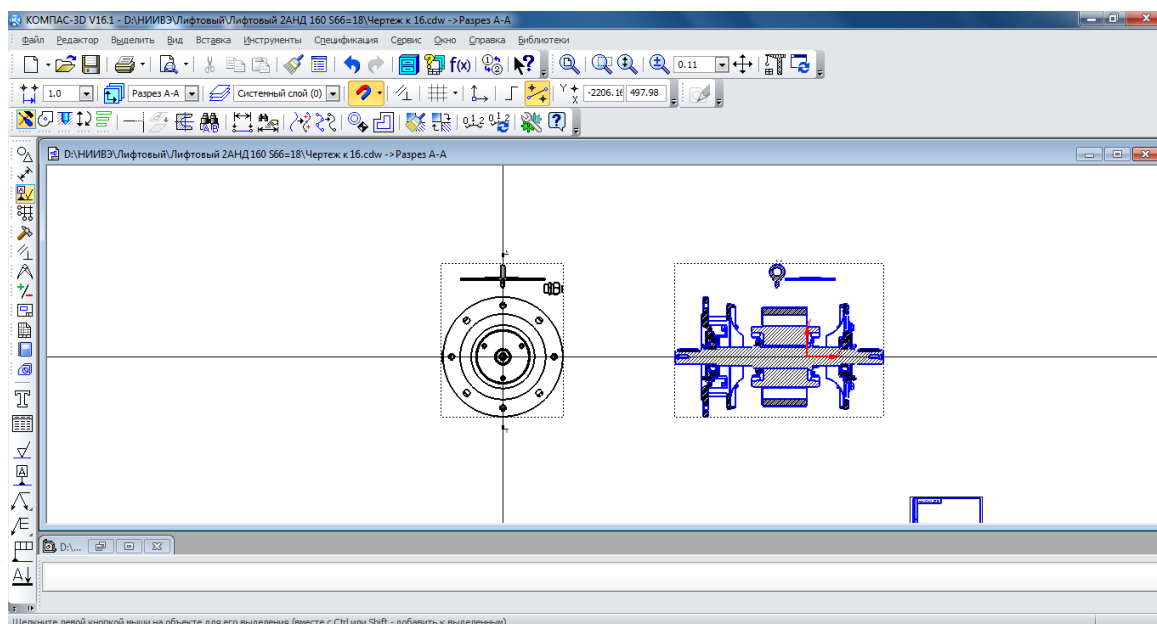


Рис. 10. Обновлённый привязочный чертёж

Использование метода точек значительно снижает возможность ошибки и затраты времени на создание эскиза детали, тем самым повышая надёжность и скорость процесса конструирования. Разработка деталей с помощью метода точек выполняется до полного заполнения каркаса сборки и создания полноценной 3D-модели электродвигателя (рис. 11).

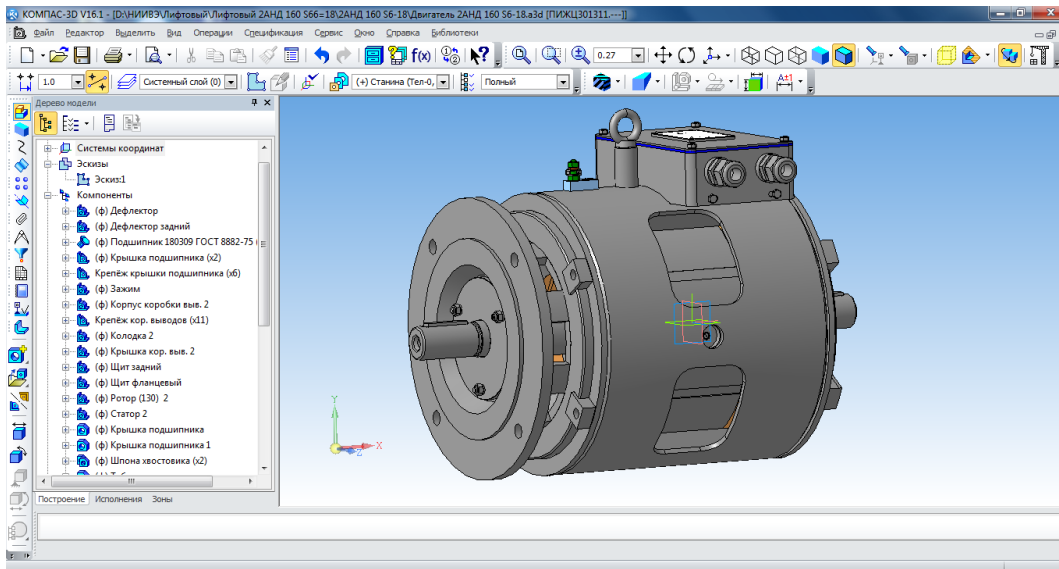


Рис. 11. 3D-модель электродвигателя 2АНД 160 S6/180

Комплект конструкторской документации на опытный образец электродвигателя выполняется стандартными методами и средствами КОМПАС с учётом требований ЕСКД. При выполнении чертежей широко используются дополнительные, промежуточные виды и разрезы, создаваемые автоматически с использованием ассоциативной связи с 3D-моделью. После окончательного оформления чертежа дополнительные и промежуточные виды и разрезы необходимо удалить, а все ассоциативные связи с 3D-моделями необходимо разрушить (рис. 12).

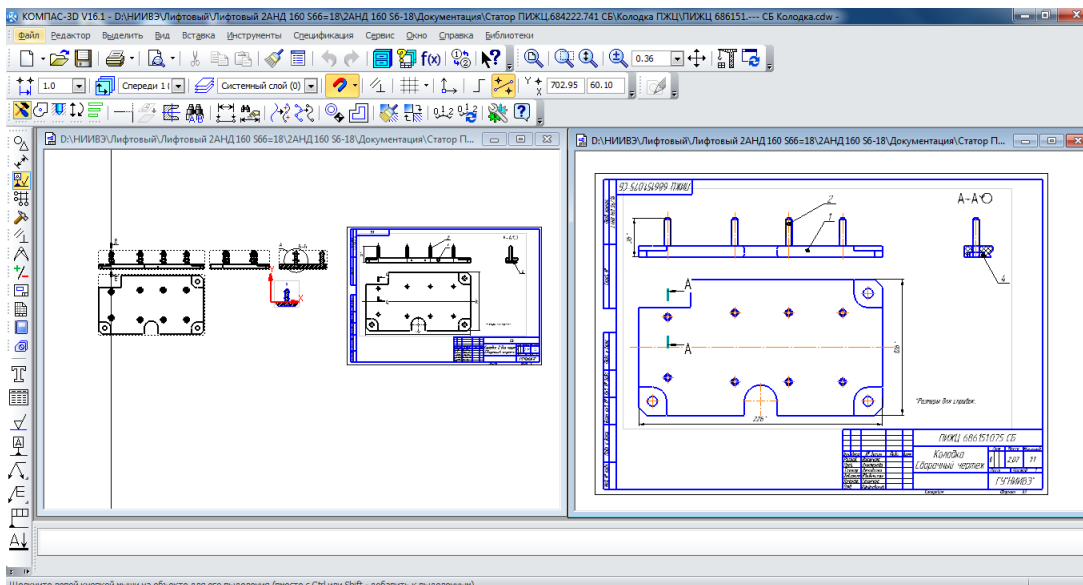


Рис. 12. Промежуточный и окончательный чертёж

Средства САПР КОМПАС при разработке 3D–модели электродвигателя и комплекта конструкторской документации на опытный образец позволяют применять процесс параллельного конструирования. При этом разработкой отдельных узлов и деталей занимаются несколько конструкторов с использованием одного привязочного чертежа и постоянным обменом информацией в сети. Также во время создания 3D–моделей сборочных единиц необходимо стремиться к автоматическому формированию объектов спецификации, соответствующих компонентам потому, что если вы создавали объекты спецификации во всех деталях и подбороках текущей сборки, то в ней оказываются все объекты, необходимые для внесения в спецификацию на эту сборку. Их можно передать в спецификацию, подключенную к сборке.

Данный способ является предпочтительным для создания в сборке объектов спецификации, соответствующих компонентам, так как формирование объектов спецификации непосредственно при работе с компонентами снижает вероятность ошибок и сокращает время необходимое на создание спецификации.

Выводы. На основе представленных в данной работе результатов сделаны следующие выводы:

1. Работа с привязочным чертежом и использование предложенного нами метода точек значительно снижает возможность ошибки и затраты времени на создание эскиза детали, тем самым повышая надёжность и скорость этапов процесса конструирования.
2. Применение процесса параллельного конструирования позволяет контролировать процесс формирования 3D–модели электродвигателя несколькими конструкторами, что также повышает надёжность и скорость процесса конструирования.
3. При моделировании сборочных единиц автоматическое формирование объектов спецификации, соответствующих компонентам, снижает вероятность ошибок и сокращает время, необходимое для создания спецификации.
4. Все вышеперечисленные способы интенсификации этапов конструирования электродвигателей в среде САПР КОМПАС в комплексе приводят к значительному сокращению рабочего времени, необходимого на создание конструкторской документации на опытные образцы электродвигателей.
5. Все вышеперечисленные способы интенсификации этапов конструирования в среде САПР КОМПАС могут быть использованы и при конструировании опытных образцов различного теплоэнергетического оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аноприенко, А. Я. Интеллектуализация техносферы: закономерности и перспективы / А. Я. Аноприенко // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2019) : Материалы X Международной научно-технической конференции (Донецк, 22–24 мая 2019 года). – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 6-18. – EDN ZZTCUW.
2. Варакута, В. В. Оценка эффективности энергогенерирующей станции, утилизирующей вторичную и низкопотенциальную теплоту в условиях угольных шахт, методом термодинамического анализа. / В. В. Варакута, А. Б. Бирюков, П. А. Гнитиев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 2. – С. 12-20.
3. Кудрявцев, Е. М. КОМПАС-3D V8. Наиболее полное руководство / Е. М. Кудрявцев. – М: ДМК Пресс, 2006. – 928 с.
4. Сафьянц, С. М. Совершенствование компьютерной подготовки студентов - теплоэнергетиков / С. М. Сафьянц, С. В. Гридин // Сб. трудов X межд. науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века». В 4-х томах. – Севастополь, Донецк: ДонНТУ, 2003. – Т. 3. – С. 88-92.

Поступила в редакцию 08.02.2024 г., рекомендована к печати 26.02.2024 г.

INTENSIFICATION OF THE DESIGN OF ELECTRIC MOTORS IN THE COMPASS CAD ENVIRONMENT

Vvedenskaia M.I., Varakuta V.V., Gridin S.V.

The article considers the possibility and relevance of intensification of the process of stages of electric motor design. The results of a study of a method for intensifying the design of electric motors in the COMPASS CAD environment are presented using the example of the design process of a 2AND 160 S6/180 elevator electric motor.

Keywords: computer-aided design, CAD COMPASS, 3D model, parallel construction.

Введенская Марина Ильинична

заведующая сектором разработки технологии электрических машин ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: vvmarina2504@yandex.ru

Vvedenskaia Marina Ilinichna

Head of the Electric Machine Technology Development Sector of Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof and Mining Electrical Equipment,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Варакута Виктор Владимирович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела электрических машин ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: varakutaviktor@mail.ru

Varakuta Viktor Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at Integrated Research Department of Electric Machines of Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof and Mining Electrical Equipment,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Гридин Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: gridin@donntu.ru

Gridin Sergei Vasilevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Industrial Heat and Power Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НА ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ СИСТЕМЫ ЖКХ

© 2024 *Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д.*

В статье рассматривается возможность экономии энергетических ресурсов путем применения глубокой утилизации тепла продуктов сгорания на водогрейных котлах системы ЖКХ. Предложена схема установки, предусматривающая экономию природного газа, выполнены необходимые расчеты.

Ключевые слова: теплоутилизатор, воздухоподогреватель, конденсационный экономайзер.

Введение. Современное развитие энергетики характеризуется значительно возросшим потреблением энергоносителей и всех видов природных ресурсов, а также постоянно увеличивающимися трудностями охраны окружающей среды от воздействия теплогенерирующих установок и промышленных предприятий. Совершенствование энерготехнологии, энергосбережение, экономия топлива и других природных ресурсов, охрана окружающей среды являются приоритетными направлениями развития фундаментальных исследований в области энергетики.

Одними из крупнейших потребителей природного газа являются котельные установки предприятий жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), коэффициент полезного действия водогрейных котлов достаточно высокий, но тоже время есть определенные резервы для повышения эффективности этих агрегатов, что особенно важно, учитывая постоянно растущую стоимость природного газа, который является основным топливом на этих установках.

Постановка задачи. Одним из направлений усовершенствования тепловых агрегатов является внедрение систем глубокого охлаждения дымовых газов, исследованию которых посвящен ряд научных работ [1-3]. Обычно системы глубокого охлаждения продуктов сгорания представляют собой конденсационные экономайзеры, в которых дымовые газы охлаждаются до температур, ниже температуры точки росы для продуктов сгорания используемого топлива. При сжигании природного газа обычно эта температура составляет 55-57°C [4], а температура продуктов сгорания после теплоутилизатора - 35-40°C. Для недопущения последующей конденсации водяных паров в дымовых каналах и трубе к ним через байпас подмешиваются неохлажденные дымовые газы или предварительно нагретый воздух.

Огромный труд по обобщению результатов научных работ по утилизации тепла выполнен сотрудниками Самарского государственного технического университета А. А. Кудиновым и С. К. Зиганшиной [3, 5], а также научным коллективом под руководством А.В. Ефимова [6]. В этих работах приведены методы расчета таких установок, их основные технические показатели, результаты промышленного использования теоретических исследований.

Работа выполнена в рамках научной темы «Повышение энергоэффективности выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии» (код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FRRF-2023-0003, регистрационный номер 1023031000013-2-2.2.3.)

Особенно решение поставленной задачи важно для водогрейных котлов малой и средней мощности, которые, как правило, не имеют в своем составе воздухоподогревателей для нагрева воздуха, подаваемого на горение. Существуют различные схемы компоновки теплоутилизаторов. Так в работах А.А. Кудинова [3] предлагается использование конденсационных экономайзеров или вращающихся воздухоподогревателей регенеративного типа, А.В. Ефимова [7] – целый комплекс теплообменников, состоящий из поверхностных и контактных теплоутилизаторов. Применение только конденсационных воздухоподогревателей достаточно сложно, что связано с проблемами при определении коэффициента теплопередачи и низкой теплоемкостью нагреваемого воздуха.

Целью данной работы является обоснование возможности использования комбинированных устройств глубокого охлаждения дымовых газов на водогрейных котлах системы ЖКХ, позволяющих в том числе выполнять подогрев воздуха, идущего на горение.

Основная часть. Данная работа посвящена разработке комбинированного устройства глубокого охлаждения дымовых газов применительно к одному из наиболее распространенных котлов типа ТВГ - 8М. В работе предлагается следующая компоновка теплоутилизатора – первая ступень представляет собой обычный конвективный трубчатый воздухоподогреватель, выполненный из гладких или оребренных труб для нагрева воздуха, вторая часть – это конденсационный экономайзер для глубокого охлаждения продуктов сгорания до температур ниже температуры точки росы. В воздухоподогревателе нагревается количество воздуха, необходимого для горения топлива и, возможно, и для последующей подачи в газодод после теплоутилизатора, чтобы температура смешанного газа (продуктов сгорания и нагретого воздуха) на входе в дымовую трубу была выше температуры точки росы. При этом в байпас подаются продукты сгорания не после котла (как это принято в традиционной схеме), а после воздухоподогревателя. Такая схема позволяет максимально использовать тепловой потенциал дымовых газов в первой ступени для увеличения располагаемого тепла, подаваемого в топку, так как при традиционной схеме с экономайзером улучшаются технико-экономические показатели котельной в целом, но при неизменном расходе топлива. Использование предложенной в данной работе схемы приводит к сокращению расхода топлива и снижению температуры точки росы продуктов сгорания. Методика расчета воздухоподогревателей из гладких или оребренных труб хорошо известна и применяется при их проектировании [8-11]. В качестве исходных данных используются результаты расчета теплового баланса котла ТВГ-8М, выполненного в соответствии с нормативным методом [10]. Топливо-природный газ с теплотой сгорания $37177,5$ кДж/м³, коэффициент избытка воздуха после экономайзера – 1,28, теоретическое количество воздуха на горение – $V_g^0 = 9,866$ м³/м³ т-ва, объем дымовых газов после котла – $V_{yx} = 13,864$ м³/м³ т-ва, номинальная тепловая мощность котла – 9,5 МДж, расход топлива по режимной карте – $B = 0,193$ м³/с.

Температура дымовых газов на входе в воздухоподогреватель принимается равной температуре уходящих из котла газов $t'_{yx} = 183^\circ\text{C}$. Для определения теплофизических свойств продуктов сгорания на выходе из воздухоподогревателя, которые зависят от температуры, предварительно их температура принимается равной 117°C . Такой выбор температуры обусловлен тем, что в этом случае 40% дымовых газов после воздухоподогревателя будет достаточно для получения необходимой температуры дымовых газов после байпаса на входе в трубу.

Тогда средняя температура дымовых газов в воздухоподогревателе равна:

$$t_{cp}^0 = (183 + 117) / 2 = 150^\circ C.$$

Теплофизические свойства дымовых газов среднего состава при температуре 150 °С определены справочным данным равны [8]: плотность $\rho_d = 0,849 \text{ кг/м}^3$; теплоемкость $C_d = 1,083 \text{ кДж/ (кг}\cdot\text{К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda_d = 3,57 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/ (м}\cdot\text{К)}$; коэффициент кинематической вязкости $\nu_d = 27,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; критерий Прандтля $Pr_d = 0,68$.

Величина теплового потока в воздухоподогревателе при работе теплообменника составит:

$$Q = G_1 \cdot C_d \cdot (t'_{yx} - t''_{yx}) = 3,468 \cdot 1,083 \cdot (183 - 117) = 247,89 \text{ кВт},$$

где G_1 - массовый расход дымовых газов при нормальных условиях, равный:

$$G_1 = B_1 \cdot \rho_d^0 \cdot V_{yx} = 0,193 \cdot 1,296 \cdot 13,864 = 3,468 \text{ кг/с},$$

где ρ_d^0 – плотность дымовых газов среднего состава при нормальных условиях, равная $1,296 \text{ кг/м}^3$; C_d – изобарная массовая теплоемкость дымовых газов среднего состава.

Температура нагретого воздуха находится из уравнения теплового баланса для воздухоподогревателя:

$$Q = G_1 \cdot C_d \cdot (t'_{yx} - t''_{yx}) = G_2 \cdot C_g^{t_{cp}} \cdot (t''_g - t'_g), \quad (1)$$

где G_2 - массовый расход воздуха через воздухоподогреватель при нормальных условиях, кг/с.

$$G_2 = B_1 \cdot \rho_g^0 \cdot V_\alpha^0 \cdot \alpha,$$

где ρ_g^0 - плотность воздуха при нормальных условиях, равная $1,293 \text{ кг/м}^3$.

$$G_2 = 0,193 \cdot 1,293 \cdot 9,866 \cdot 1,05 = 2,585 \text{ кг/с}.$$

Принимаем начальную температуру воздуха на входе в воздухоподогреватель, равной температуре воздуха в помещении котельной 30°С, массовая теплоемкость воздуха при этой температуре равна $1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, конечная температура определяется из уравнения теплового баланса. Так как теплоемкость воздуха зависит от температуры, то используется метод последовательных приближений. В качестве первого приближения принимается температура t''_g , равная 125°С. Тогда средняя температура воздуха в воздухоподогревателе равна:

$$t_g^{cp} = (t''_g - t'_g) / 2 = (30 + 125) / 2 = 77,5^\circ C.$$

Массовая теплоемкость воздуха при этой температуре равна $1,005 \text{ кДж/ (кг}\cdot\text{К)}$ [8]. Тогда конечная температура воздуха по уравнению (1) будет равна:

$$t''_g = t'_g + Q / (G_2 \cdot C_2) = 30 + 247,89 / (1,009 \cdot 2,585) = 125^\circ C.$$

Так как расчетная температура воздуха после воздухоподогревателя совпадает с первоначально принятой, то уточнение не требуется. Таким образом, температура воздуха на горение после воздухоподогревателя будет равна 125°С.

Для определения коэффициентов теплоотдачи рассмотрим отдельно дымовую и воздушную стороны теплообменника. Считаем, что воздухоподогреватель выполнен по классической для котельных установок схеме. Дымовые газы проходят внутри стальных труб с внутренним диаметром 30 мм, воздух омывает наружную поверхность. Схема теплообменника – перекрестный ток. Для определения режима течения внутри труб определяется критерий Рейнольдса. Для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи задаемся двумя скоростями дымовых газов из интервала, рекомендованного по литературным источникам, а именно 16 и 12 м/с.

$$Re = (w \cdot d) / \nu_{\partial}, \quad (2)$$

где ν_{∂} – коэффициент кинематической вязкости дымовых газов при их средней температуре и равный $27,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Тогда для двух скоростей продуктов сгорания критерии Рейнольдса по формуле (2) соответственно равны 17680 и 13260.

Очевидно, что в обоих случаях режим течения – турбулентный (критерий Рейнольдса больше 10000). В этом случае для определения коэффициента конвективной теплоотдачи может быть использовано следующее критериальное уравнение [8]:

$$Nu = (0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr) / (1 + 2,14 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{0,7} - 1)),$$

где Pr – критерий Прандтля для дымовых газов при их средней температуре 150°C и равный 0,68; Nu – критерий (число) Нуссельта.

Определим величину критерия Нуссельта для обеих принятых ранее скоростей дымовых газов. После подстановки значений критерии Нуссельта для рассматриваемых случаев будут соответственно равны 48,3 и 38,638.

По вычисленному значению критерия Нуссельта определяется величина коэффициента конвективной теплоотдачи от дымовых газов к стенке трубы:

$$\alpha_{\partial} = (Nu \cdot \lambda_{\partial}) / d,$$

где $\lambda_{\partial} = 3,57 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопроводности продуктов сгорания среднего состава при температуре 150°C .

$$\alpha_{\partial 1} = 48,3 \cdot 3,57 \cdot 10^{-2} / 0,03 = 57,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\alpha_{\partial 2} = 38,638 \cdot 3,57 \cdot 10^{-2} / 0,03 = 45,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для определения коэффициента конвективной теплоотдачи от наружной поверхности труб при шахматном их расположении в пучке используется следующее критериальное уравнение [12, 13]:

$$Nu_g = 0,4 \cdot Re_g^{0,6} \cdot Pr_g^{0,36} \cdot (Pr_g / Pr_{cm})^{0,25}, \quad (3)$$

где Nu_g – критерий Нуссельта для воздуха при его движении в пучке; Re_g – критерий Рейнольдса; Pr_g – критерий Прандтля для воздуха при его средней температуре; $(Pr_g / Pr_{cm})^{0,25}$ – так называемая поправка Михеева М.А. [6], учитывающая направление теплового потока в системе.

Величина критерия Прандтля для воздуха является табличной величиной и зависит от температуры. В соответствие с [8, 11], для средней температуры 77,5°C эта величина определяется путем интерполяции и равна 0,693.

При расчете необходимо учитывать, что записанное уравнение (3) позволяет определить коэффициент конвективной теплоотдачи для труб, начиная с 3-го ряда. Величина поправочного коэффициента на рядность труб шахматного пучка ($z \leq 16$) [8] равна:

$$C_z = 0,98663 - 0,36513 \exp(-(z - 0,92228) / 2,24791).$$

В связи с этим после предварительной компоновки теплообменника необходимо учесть его рядность этим коэффициентом, величина которого при числе рядов более 16 равна 1,0.

Критерий Рейнольдса при омывании воздухом пучка труб определяется по формуле:

$$Re_g = w_g \cdot d_{нар} / \nu_d,$$

где w_g - скорость воздуха в шахматном пучке, принимается равной 5,75 м/с; $d_{нар}$ - характерный геометрический размер, в данном случае - это наружный диаметр трубы, равный 0,035 м.; ν_d - коэффициент кинематической вязкости воздуха при его средней температуре. Определяется путем интерполяции с использованием таблиц [8, 11] и равен $20,849 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Тогда критерий Рейнольдса для воздуха будет равен:

$$Re_g = 5,75 \cdot 0,035 / 20,849 \cdot 10^{-6} = 9653.$$

Подставляя значения в уравнение (3), получим:

$$Nu_g = 0,4 \cdot (9653)^{0,6} \cdot (0,693)^{0,36} = 0,4 \cdot 245,922 \cdot 0,876 = 86,17.$$

Определим коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha_g = Nu_g = \lambda_g / d_{нар} = 86,17 \cdot 3,03 \cdot 10^{-2} / 0,035 = 74,6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где λ_g - коэффициент теплопроводности воздуха при его средней температуре. Эта величина определяется путем интерполяции с использованием таблиц теплофизических свойств воздуха при разных температурах [8, 11]. При температуре 77,5°C эта величина равна $3,03 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Определим коэффициент теплопередачи для воздухоподогревателя. Пренебрегая термическим сопротивлением процессу теплопроводности стенки трубы, эта величина может быть определена, как для плоской стенки:

$$K = \xi \cdot (\alpha_d \cdot \alpha_g) / (\alpha_d + \alpha_g),$$

где ξ - коэффициент использования воздухонагревателей. Для трубчатых воздухоподогревателей котлов, работающих на газообразном топливе, эта величина может быть принята равной 0,85 [10]. Расчеты выполним для двух скоростей продуктов сгорания, для которых определялись коэффициенты конвективной теплоотдачи.

$$K_1 = 0,85 \cdot 57,48 \cdot 74,6 / (57,48 + 74,6) = 27,60 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$K_2 = 0,85 \cdot 45,98 \cdot 67,8 / (45,98 + 67,8) = 24,18 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Определим вспомогательные параметры P и R для перекрестного тока:

$$P = (t''_e - t'_e) / (t'_{yx} - t'_e) = (125 - 30) / (183 - 30) = 0,621,$$

$$R = (t'_{yx} - t''_{yx}) / (t''_e - t'_e) = (183 - 117) / (125 - 30) = 0,695.$$

В соответствие с графиками в справочной литературе [8, 11] поправка на перекрестный ток может быть принята равной 1,0. Определим разности температур на входе и выходе из теплообменника:

$$\Delta t_1 = t'_{yx} - t''_e = 183 - 125 = 58,$$

$$\Delta t_2 = t''_{yx} - t''_e = 117 - 30 = 87.$$

Среднелогарифмическая разность температур в теплообменнике будет равна:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_1 - \Delta t_2) / \ln(\Delta t_1 / \Delta t_2) = (58 - 87) / \ln 58 / 87 = 71,6.$$

Площадь поверхности воздухоподогревателя для рассматриваемых случаев будет равна:

$$F = (Q \cdot 1000) / (K \cdot \Delta t_{cp}),$$

$$F_1 = (247,89 \cdot 1000) / (27,60 \cdot 71,6) = 125,44 \text{ м}^2,$$

$$F_2 = (247,89 \cdot 1000) / (24,18 \cdot 71,6) = 144,18 \text{ м}^2,$$

Таким образом, общая площадь воздухоподогревателя в зависимости от скорости продуктов сгорания должна составлять от 125 до 143 м² при использовании гладких труб с внутренним диаметром 30 мм и наружным 35 мм.

В результате проведенных расчетов можно сделать важный вывод, что коэффициенты конвективной теплоотдачи как с дымовой, так и воздушной сторон имеют значения достаточно близкие и поэтому одностороннее оребрение труб не даст большого эффекта. Эффективным в этом случае является применение игольчатых рекуператоров с иглами с двух сторон. Тепловая работа и теплотехнические расчеты игольчатых рекуператоров достаточно хорошо изучены [14]. Применение таких рекуператоров целесообразно по двум причинам - продукты сгорания природного газа не содержат пыли и поэтому не будет заноса игольчатой поверхности, с другой стороны при использовании труб 17,7 при рекомендованных скоростях воздуха 5,75 м/с и дыма 2,0 м/с коэффициент теплопередачи может достигать значений до 130 Вт/м² К. В этом случае площадь поверхности воздухоподогревателя составит около 26 м².

Выполним расчет второй ступени - конденсационного экономайзера. В качестве конденсационного теплоутилизатора выбираем биметаллический калорифер типа КСк-4-11-02 ХЛЗ, который изготавливается на АО «Калориферный завод» г. Кострома, который успешно использовался Кудиновым А.А. с сотрудниками [3, 5] на Ульяновской ТЭЦ-3. Основными факторами, влияющими на такой выбор, являются следующие: наличие ребер и применение в качестве одного из материалов алюминия приводит к снижению термических сопротивлений, и главное - полученное этими авторами на основе экспериментальных данных критериальное уравнение для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи с учетом конденсации, что позволяет его использование и для других случаев.

Теплообменный элемент теплоутилизатора – биметаллическая трубка, состоящая из двух трубок. Внутренняя трубка – стальная $d_{вн} \times S = 16 \times 1,2$ мм, наружная трубка – алюминиевая с накатанным оребрением. Ребристая поверхность имеет диаметр по вершине ребер 39 мм, по основаниям ребер – 18 мм. Толщина ребер у основания 0,8 мм, у вершины – 0,3 мм. Профиль ребра трапецевидный.

Коэффициент теплопередачи через ребристую многослойную стенку при отнесении теплового потока к оребренной поверхности определяется по формуле [13]:

$$k_{км} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_в} \frac{F_2}{F_1} + \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) \frac{F_2}{F_1} + \frac{1}{\alpha_н}},$$

где $\alpha_в$, $\alpha_н$ – коэффициенты теплоотдачи соответственно на внутренней и наружной поверхности рабочей трубки калорифера, Вт/(м²·К); F_2/F_1 – отношение наружной оребренной поверхности к внутренней гладкой поверхности (коэффициент оребрения); δ_1 , δ_2 – толщина стенки соответственно внутренней стальной трубки и наружной алюминиевой трубки, м; λ_1 , λ_2 – коэффициент теплопроводности соответственно материала внутренней и наружной стенки рабочей трубки калорифера, Вт/(м·К).

Так как отношение диаметров $d_{вн}/d_н=0,016/0,018=0,8889>0,5$, то можно использовать формулу для плоской стенки, записанную в следующем виде:

$$k_{км} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_н}}. \quad (4)$$

Для определения температуры точки росы может использоваться формула, приведенная в работах И.З. Аронова [1, 3], или методика расчета для любого состава топлива, приведенная в работе [4].

$$t_p = 37,1 \cdot \ln d / (3,77 + 0,085 \cdot \alpha_{yx}),$$

где d – влагосодержание продуктов сгорания, г/кг с.г.

$$t_p = 37,1 \cdot \ln(0,1169 \cdot 10^{-3}) / (3,77 + 0,085 \cdot 1,28) = 54,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Принимаем температуру дымовых газов на выходе из экономайзера, исходя из условия запаса температуры, равной 40°C. Принимаем, что 60% объемного расхода уходящих газов после воздухоподогревателя отправляются на теплоутилизацию, а оставшиеся 40% - направляются через линию байпасирования на подогрев уходящих дымовых газов после теплоутилизатора для предотвращения конденсатообразования в дымовой трубе.

Проверим принятое допущение, определив температуру дымовых газов после смешения при байпасировании. Принимая, что объемная теплоемкость дымовых газов в интервале температур 0-300°C равна 1,42 кДж/м³К [14], температура продуктов сгорания после байпаса будет равна 70,8 °С.

Так как эта температура больше температуры точки росы на 15,9°C, то можно сделать вывод, что соотношение расходов дымовых газов, направляемых на теплоутилизатор и на байпасирование, выбрано правильно. При этом в зависимости от условий отвода тепла в каналах и дымовой трубе (например, в зимний и летний периоды) соотношение между объемами продуктов сгорания на экономайзер и байпас может изменяться.

Объемный расход дымовых газов при нормальных физических условиях определим по формуле:

$$V_n = 0,6 \cdot B \cdot V_{yx} = 0,6 \cdot 0,193 \cdot 13,864 = 1,61 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Теплопроизводительность утилизатора при глубоком охлаждении дымовых газов по формуле И. З. Аронова:

$$Q_{кт} = V_n \left[0,33(t_{yx} - t_{кт}) + 435 \frac{X'_{yx} - X''_{yx}}{0,6 + X'_{yx}} \right] 1,163,$$

где X'_{yx} – влагосодержание продуктов сгорания на входе в теплоутилизатор, кг/кг с.г.;
 X''_{yx} – влагосодержание насыщенных продуктов сгорания на выходе из теплоутилизатора, кг/кг с.г.;

Влагосодержание дымовых газов определяется по приближенным формулам Л. Г. Семенюка [5]. Влагосодержание дымовых газов на входе в теплоутилизатор:

$$X'_{yx} = (0,13 + X_b \cdot \alpha_{yx}) / (\alpha_{yx} - 0,058),$$

где X_b – влагосодержание дутьевого воздуха, кг/кг с.в., в расчетах принимается $X_b = 0,01$ кг/кг с.в.;

$$X'_{yx} = (0,13 + 0,01 \cdot 1,28) / (1,28 - 0,058) = 0,1169 \text{ кг} / \text{кг с.г}.$$

Влагосодержание дымовых газов после теплоутилизатора:

$$X''_{yx} = (0,0006382 + 0,004 \cdot \alpha_{yx}) / (\alpha_{yx} - 0,199) \cdot e^{0,062 \cdot v''_{yx}},$$

$$X''_{yx} = (0,0006382 + 0,004 \cdot 1,28) / (1,28 - 0,199) \cdot e^{0,062 \cdot 40} = 0,0464 \text{ кг} / \text{кг с}.$$

Тогда теплопроизводительность утилизатора тепла составит:

$$Q_{кт} = 1,61 \cdot 3600 \left[0,33(117 - 40) + 435 \frac{0,1169 - 0,0464}{0,6 + 0,1169} \right] 1,163 = 459637,7 \text{ Вт},$$

$$Q_{кт} = 459,6377 \text{ кВт}.$$

Расход нагреваемой воды определяется по формуле:

$$G_g = Q_{km} / (c_v \cdot (t''_{гд} - t'_{гд})),$$

где c_v – теплоемкость воды при средней температуре, кДж/(кг·К).

По справочным данным [11] при $t_{cp} = 25^\circ\text{C}$ теплоемкость воды составляет $c_v = 4,179$ кДж/(кг·К). Тогда расход воды:

$$G_g = 459,6377 / 4,179 \cdot (40 - 10) = 3,67 \text{ кг} / \text{с}.$$

Средний температурный напор в теплоутилизаторе определяем по формуле:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}) / (\ln(\Delta t_{\delta}) / (\Delta t_{m})), \quad (5)$$

где $\Delta t_{\delta}, \Delta t_{m}$ – большая и меньшая разность температур, определяемая для противотока соответственно:

$$\Delta t_{\delta} = t_{yx} - t''_{гд} = 117 - 40 = 77^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_{m} = t_{my} - t'_{гд} = 40 - 10 = 30^\circ\text{C}.$$

Тогда средний температурный напор по уравнению (5) составит $49,86^\circ\text{C}$.

Для определения термического сопротивления стенок трубок по справочным данным [11] используются коэффициенты теплопроводности стали и алюминия, которые составляют $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·К) и $\lambda_2 = 205$ Вт/(м·К) соответственно.

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0,0012}{50} + \frac{0,001}{205} = 2,89 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}.$$

Определим коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к нагреваемой воде. Для этого определим режим движения жидкости по критерию Рейнольдса:

$$Re_g = (w_g \cdot d_g) / \nu_g = (3 \cdot 0,0136) / (0,906 \cdot 10^{-6}) = 45033,$$

где w_g – скорость воды в трубках, принимается в диапазоне 2...4 м/с, принимаем равной 3 м/с; d_g – внутренний диаметр трубы, м; ν_g – коэффициент кинематической вязкости воды, определяемый по средней температуре воды в теплоутилизаторе по справочным данным [11] и равный $\nu_g = 0,906 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Так как критерий Рейнольдса $Re > 10^4$, то режим течения турбулентный. Критериальное уравнение, описывающее теплоотдачу при турбулентном режиме движения жидкости в трубе, имеет вид [13]:

$$Nu_g = 0,021 \cdot Re_g^{0,8} Pr_g^{0,43} \cdot (Pr_g / Pr_{cm})^{0,25} \cdot \varepsilon_l,$$

где Pr_g, Pr_{cm} – критерий Прандтля при средней температуре воды и при температуре стенки соответственно; ε_l – поправочный коэффициент, при $l/d > 50$ $\varepsilon_l = 1$.

Так как температура стенки неизвестна, а коэффициент теплоотдачи велик, то температура стенки будет незначительно отличаться от температуры подвижной среды. Тогда уравнение можно записать следующим образом:

$$Nu_g = 0,021 \cdot Re_g^{0,8} Pr_g^{0,43}.$$

Подставим величины:

$$Nu_g = 0,021 \cdot 45033^{0,8} \cdot 6,22^{0,43} = 243,43.$$

Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к нагреваемой воде определим по формуле:

$$\alpha_g = (Nu_g \cdot \lambda_g) / d_g = (243,43 \cdot 0,6085) / 0,0136 = 10891 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где λ_g – коэффициент теплопроводности, определяемый при средней температуре воды, Вт/(м·К).

Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности теплоутилизатора определяется исходя из критериального уравнения, выведенного Кудиновым А.А для теплоутилизаторов поверхностного типа КСк [3]:

$$Nu_z = 4,55 \cdot Re_z^{0,315} K_z^{0,388} \cdot Pr_z^{2/3},$$

где Re_z – критерий Рейнольдса дымовых газов; K_z – критерий орошения; Pr_z – критерий Прандтля, определяемый по средней температуре дымовых газов, равный $Pr_z = 0,6831$.

Критерий Рейнольдса для дымовых газов определяется по формуле:

$$Re_z = (w_z \cdot d_n) / \nu_z = (3 \cdot 0,018) / (19,532 \cdot 10^{-6}) = 2764,69,$$

где w_z – скорость дымовых газов в межтрубном пространстве, принимается в диапазоне 2...5 м/с, окончательно принимаем равной 3 м/с; d_n – наружный диаметр трубы, м; ν_z – коэффициент кинематической вязкости дымовых газов, определяемый по средней температуре дымовых газов в теплоутилизаторе по справочным данным [8, 11] и равный $\nu_z = 19,532 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Критерий орошения определяется по формуле:

$$K_z = (W \cdot d_n) / (\mu_z \cdot 3600), \quad (6)$$

где W – плотность орошения, кг/(м²·ч); μ_z – коэффициент динамической вязкости дымовых газов при средней температуре, равный $\mu_z = 17,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Плотность орошения наружной поверхности теплообменника конденсатом водяных паров из продуктов сгорания рассчитывается по формуле:

$$W = G_k / F_{кт}, \quad (7)$$

где G_k – количество конденсата водяных паров, выделяющегося из продуктов сгорания при их охлаждении ниже точки росы, кг; $F_{кт}$ – площадь поверхности теплообмена конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа, м².

Так как на данном этапе расчетов площадь теплоутилизатора является неизвестной величиной, то расчет производится методом последовательных приближений, изложенным в [3, 5], в следующем порядке:

- 1) задаемся величиной поверхности теплообмена $F'_{кт}$;
- 2) рассчитываем плотность орошения наружной поверхности теплообменника конденсатом водяных паров из продуктов сгорания W ;
- 3) определяем коэффициент теплоотдачи от газов к наружной поверхности теплоутилизатора α_g ;
- 4) рассчитывается площадь теплообменной поверхности теплоутилизатора $F_{кт}$ по уравнению теплопередачи;

5) сравнивается заданная и расчетная площади поверхности. В случае расхождения значений $F'_{кт}$ и $F_{кт}$ более, чем на 1...2%, расчет повторяют до заданной точности расчета.

Задаем величину поверхности теплообмена $F'_{кт} = 160 \text{ м}^2$. Количество получаемого из продуктов сгорания конденсата водяных паров при их охлаждении ниже точки росы определяется по формуле:

$$G_k = [g_{c.z.}^0 + g_{c.v.}^0 (\alpha_{yx} - 1)] (X'_{yx} - X''_{yx}),$$

где $g_{c.z.}^0, g_{c.v.}^0$ – теоретический расход сухих продуктов сгорания и сухого дутьевого воздуха, кг/с, а X'_{yx}, X''_{yx} – влагосодержание продуктов сгорания соответственно на входе в теплоутилизатор и на выходе из него, кг/кг с.г.

Теоретический расход сухих продуктов сгорания определяем по формуле:

$$g_{c.z.}^0 = 0,6 \cdot V_u^0 \cdot B \cdot \rho_z = 0,6 \cdot 8,857 \cdot 0,193 \cdot 0,8756 = 0,9 \text{ кг / с}.$$

Теоретический расход сухого воздуха определяется по формуле:

$$g_{c.v.}^0 = 0,6 \cdot V_0 \cdot B \cdot \rho_v = 0,6 \cdot 9,866 \cdot 0,193 \cdot 1,247 = 1,42 \text{ кг / с},$$

где V_0 – теоретическое количество воздуха на горение, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ρ_v – плотность сухого воздуха при температуре воздуха, подаваемого в топку.

Тогда количество получаемого конденсата составит:

$$G_k = [0,9 + 1,42(1,28 - 1)](0,1169 - 0,0464) = 0,091 \text{ кг / с}.$$

Тогда плотность орошения по уравнению (7) будет равна 2,05 кг/($\text{м}^2 \cdot \text{ч}$), а критерий орошения по формуле (6) составит 0,6.

Критерий Нуссельта по уравнению Кудинова А.А.:

$$Nu_z = 4,55 \cdot 2764669^{0,315} \cdot 0,6^{0,388} \cdot 0,6831^{2/3} = 35,13.$$

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке определяется по формуле:

$$\alpha_z = (35,13 \cdot 0,095) / 0,018 = 57,57 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)},$$

где λ_z – коэффициент теплопроводности, определяемый при средней температуре дымовых газов, Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$).

Коэффициент теплопередачи по уравнению (4) с учетом термических сопротивлений будет равен 57,17 Вт/ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$). С учетом того, что термическое сопротивление стенок трубы очень мало, зачастую им можно пренебречь.

Уточненную площадь поверхности теплообмена конденсационного поверхностного теплоутилизатора определим по уравнению теплопередачи:

$$F_{км} = Q_{км} / (k_{км} \cdot \Delta t_{cp}) = 459637,7 / (57,57 \cdot 49,86) = 161,1 \text{ м}^2.$$

Расхождение между принятой и полученной площадями менее 1%, значит расчет окончен. Принимаем площадь поверхности теплоутилизатора равной 161 м^2 .

Необходимо также учесть предварительный подогрев воздуха в воздухонагревателе до 125°C. Количество тепла, вносимого воздухом, учитывается в левой части уравнения теплового баланса при расчете располагаемого тепла:

$$Q_{\text{в-х}} = V_{\text{в-х}} \cdot C_{\text{в-х}} \cdot t,$$

где $C_{\text{в-х}}$ – теплоемкость воздуха при температуре подогрева 125°C, определяется как:

$$C_{\text{в-х}} = 1,2866 + 0,0001201 \cdot t = 1,2866 + 0,0001201 \cdot 125 = 1,302 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

$$Q_{\text{в-х}} = 9,866 \cdot 1,05 \cdot 1,302 \cdot 125 = 1686,0 \text{ кДж} / \text{м}^3 \text{т-ва}.$$

Тогда располагаемое тепло будет равно $Q_p = 37177,5 + 1686,0 = 38863,5$ кДж/(м³т-ва). Таким образом, доля тепла, вносимого нагретым воздухом, составит около 4,5 % от вносимого в топку природным газом, что приведет к соответствующей экономии природного газа.

Выводы. Использование комбинированных теплоутилизаторов, предполагающих нагрев воздуха, идущего на горение, на водогрейных котлах является целесообразным, так как позволяет повысить технико-экономические показатели котельных в целом и сократить расход природного газа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аронов, И. З. Использование тепла уходящих газов газифицированных котельных / И. З. Аронов. – Москва: Энергия, 1967. – 192 с.
2. Аронов, И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. З. Аронов. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
3. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
4. Бирюков, А. Б. Методика определения температуры точки росы продуктов сгорания природного газа / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, К. Д. Каминский // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып.6. – С.43-49.
5. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А. А. Кудинов. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 139 с.
6. Современные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках, их проблемы и пути решения / А. В. Ефимов, А. Л. Гончаренко, Л. В. Гончаренко, Т. А. Есипенко // Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – 233 с.
7. Ефимов, А. В. Разработка пластинчатого воздухоподогревателя конденсационного типа для теплоутилизационной системы / А. В. Ефимов, А. Л. Гончаренко, Л. В. Гончаренко // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2012. – №2(31). – С.83–90.
8. Володин, В. И. Примеры теплового расчета конвективных поверхностей нагрева парового котла и конденсатора паротурбинной установки: учеб. -метод. пособие для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / В. И. Володин, Т. Б. Карлович. – Минск: БГТУ, 2023. – 74 с.
9. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Методические указания: РД 24.035.05-89: введ. 01.07.1990. – Л.: НПО ЦКТИ, 1991. – 211.
10. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – М.: Энергия. – 2000. – 380 с.
11. Казанцев, Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Е. И. Казанцев. – М.: «Металлургия». – 1975. – 368 с.
12. Михеев, М. А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия. – 1977. – 345 с.
13. Исаченко, В. П. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия. – 1975. – 488 с.
14. Тебеньков, Б. П. Рекуператоры для промышленных печей/ Б. П. Тебеньков. – М.: Металлургия, 1975. – 296 с.

Поступила в редакцию 26.02.2024 г., рекомендована к печати 12.03.2024 г.

THE USE OF COMBINED DEEP FLUE GAS COOLING DEVICES ON HOT WATER BOILERS OF THE HOUSING AND COMMUNAL SERVICES SYSTEM

Biriukov A.B., Lebedev A.N., Kaminskii K.D.

The article considers the possibility of saving energy resources by using deep heat recovery of combustion products on hot water boilers of the housing and communal services system. The scheme of the installation is proposed, which provides for saving natural gas, and the necessary calculations are performed.

Keywords: heat exchanger, air heater, condensation economizer.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Лебедев Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: lan.fmt@mail.ru

Lebedev Aleksandr Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Technical Thermophysics of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Каминский Кирилл Дмитриевич

студент факультета металлургии и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: k4minky.k@yandex.com

Kaminskii Kirill Dmitrievich

Student of the Faculty of Metallurgy and Thermal Power Engineering of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ВАРИАНТОВ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ В ПРОФИЛИРОВАННЫХ КАНАЛАХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

© 2024 *Базыкин Д.А., Дахин С.В., Бараков А.В.*

В статье рассмотрено техническое решение, заключающееся в численном моделировании интенсификации теплообмена в автономных энергетических установках, служащих для генерации электроэнергии в районах, значительно удаленных от централизованной инфраструктуры, на которых присутствуют собственные энергоносители. Описана конструкция и принцип действия экспериментальной установки, созданной с целью проработки режимов эксплуатации и оптимизации конструкции. Представлены результаты численного моделирования процессов теплообмена в каналах указанной установки и различных вариантов его интенсификации. Выбранные варианты способствуют увеличению количества тепловой энергии, переданной термоэлектрическим генераторным модулям, росту мощности генерируемого тока, а также снижению капиталовложений за счет уменьшения количества модулей при той же величине электрической мощности, по сравнению с базовым вариантом исполнения.

Ключевые слова: термоэлектрические генераторные модули, эффект Зеебека, эффект Ранка-Хилша, энергетическая установка, генерация электроэнергии, перегородки, численное моделирование, теплообмен, каналы, прямоугольное поперечное сечение.

Введение. В настоящее время широкое развитие получили электронные программные комплексы, позволяющие моделировать практически любые технические задачи при задании определенных граничных условий. Данные программы обеспечивают возможность предварительного численного решения упомянутых задач при высокой сходимости с данными, полученными в ходе натуральных экспериментов или, непосредственно, при эксплуатации. В свою очередь, предварительная виртуальная проработка той или иной прикладной задачи способствует сокращению капитальных, эксплуатационных и временных затрат на изготовление соответствующих имеющимся условиям вариантов экспериментальных стендов или установок, а также на проведение множественных практических экспериментов. К таким программным средствам относятся CAD (Computer-Aided Design) системы, или системы автоматизированного проектирования, которые позволяют проводить трехмерное моделирование изделий и устройств, а также разрабатывать конструкторскую документацию, и CAE (Computer-Aided Engineering) системы, предназначенные для решения многих инженерных задач: проведения расчетов, численного моделирования физических процессов и их анализа [1, 2]. К числу лидирующих компаний-разработчиков в указанной отрасли относится ANSYS Inc., программные комплексы которой открывают широкие возможности численного моделирования различных физических процессов и решения множества конструкторско-технологических вопросов [3].

Одной из технических задач, решение которых возможно с помощью применения упомянутых программных комплексов, является задача численного моделирования теплообмена, а также методов его интенсификации в прямоугольных каналах термоэлектрической генераторной установки.

Указанная установка может быть использована в качестве автономного источника электропитания на значительно удаленных от центров энергоснабжения объектах газодобывающей отрасли промышленности [4, 5]. При этом основными ее преимуществами являются:

- экологичная генерация электроэнергии с отсутствием каких-либо выбросов в атмосферу;
- отсутствие шума;
- отсутствие движущихся и вращающихся частей, что, в свою очередь, исключает применение смазочных материалов;
- длительный межремонтный интервал;
- отсутствие необходимости в периодическом техническом обслуживании.

Описание и принцип действия установки. Основной принцип получения электроэнергии в данной установке базируется на использовании эффекта Зеебека в термоэлектрических генераторных модулях [6, 7]. Как известно, для реализации упомянутого эффекта и обеспечения работоспособности модулей необходим источник низкопотенциального тепла, правильный выбор и поиск которого также являются достаточно сложными задачами. На объектах газодобывающей отрасли целесообразно в качестве рабочего тела для таких энергоустановок применять непосредственно энергию потока добываемого природного газа. При этом, без применения сжигания того или иного вида топлива в технологическом цикле, необходимо получить нагретый и охлажденный газовые потоки с целью создания необходимой разницы температур между противоположными сторонами термоэлектрических генераторных модулей.

С целью оптимизации конструкции установки, отработки различных режимов работы, возможных вариантов интенсификации теплообмена и выбор наиболее оптимального, определения основных характеристик газовых потоков и количества генерируемой электрической мощности, верификации результатов численного моделирования была создана экспериментальная термоэлектрическая генераторная установка [8].

Принципиальная схема экспериментальной термоэлектрической генераторной установки представлена на рис. 1.

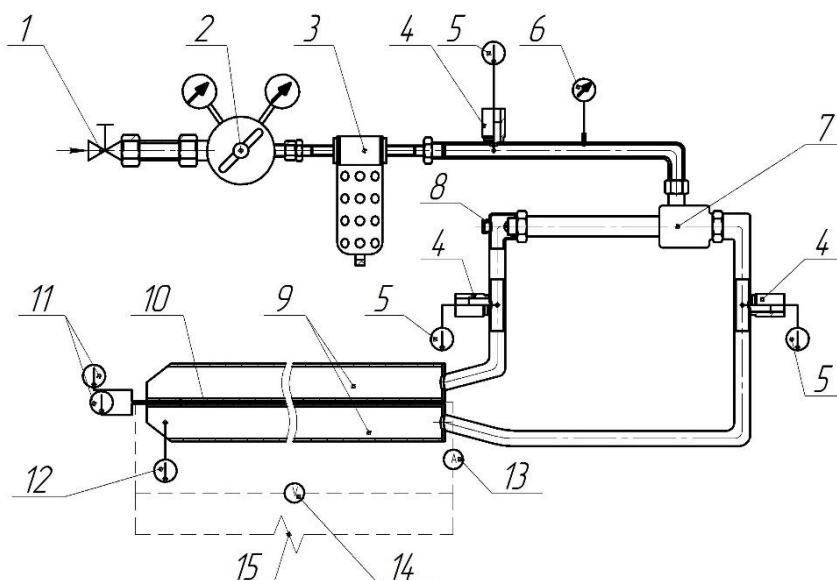


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной термоэлектрической генераторной установки

Для получения термически разделенных потоков рабочего тела может быть использована противоточная вихревая труба, принцип работы которой базируется на вихревом эффекте Ранка-Хилша и заключается в тангенциальной подаче потока газа в камеру вихревого энергоразделения, в которой происходит завихрение газового потока с одновременным термическим разделением на холодный и горячий потоки, при этом холодный поток направляется по приосевой области к выходу холодного потока, а горячий поток движется по пристеночной, периферийной зоне к выходу горячего потока. Данный эффект температурного разделения является наиболее подходящим для генерации потоков с разной температурой в приведенных условиях с точки зрения экологичности процесса [9, 10].

Принцип работы созданной экспериментальной установки состоит в следующем. С помощью вентиля 1 регулируется подача газообразного рабочего тела (воздуха) в установку. Воздух направляется через регулятор давления 2, с помощью которого осуществляется регулировка давления газа перед подводящим патрубком вихревой трубы 7. Поток воздуха, имеющего необходимое для определенного режима давление, направляется на очистку газового от механических примесей в газовом фильтре 3, из которого выполняется тангенциальная подача потока в вихревую трубу 7. Далее в камере вихревого энергоразделения вихревой трубы происходит процесс термического разделения поступившего воздушного потока, при этом регулировка количественного соотношения холодного и горячего потоков реализуется посредством дроссельного устройства, доступ к которому организуется с помощью открытия пробки 8. Холодный и горячий воздушные потоки из вихревой трубы направляются в термоэлектрический генератор, выполненный из двух алюминиевых профилированных каналов 9 с прямоугольным поперечным сечением, между которыми плотно зажаты термоэлектрические генераторные модули 10. Генерируемый термоэлектрическими модулями электрический ток подается к нагрузке 15. Для осуществления постоянного контроля характеристик потоков на протяжении рабочего цикла в составе установки присутствуют датчики давления 6 и температуры 5, 11, 12, а для контроля характеристик электрического тока применяются амперметр 13 и вольтметр 14.

Трехмерная модель экспериментальной термоэлектрической генераторной установки представлена на рис. 2.

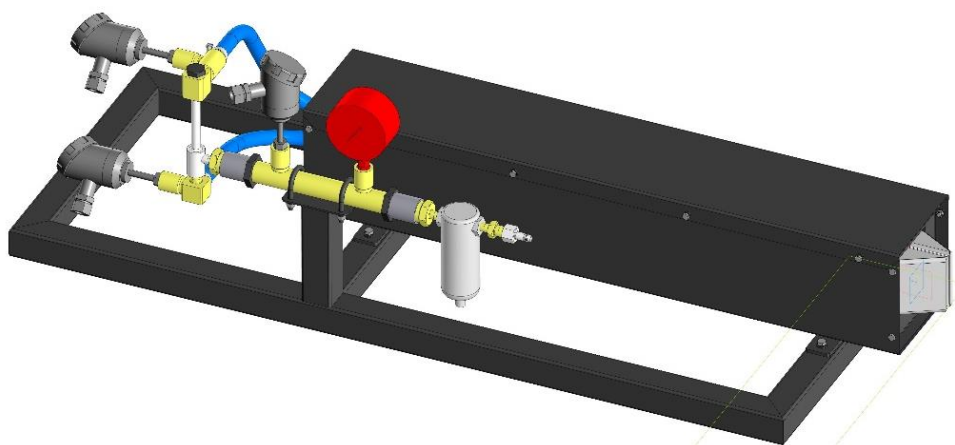


Рис. 2. Экспериментальная термоэлектрическая генераторная установка

В составе данной экспериментальной установки в качестве источника холодного и горячего потоков воздуха используется противоточная вихревая труба Nex Flow 50040H, которая имеет следующие характеристики:

- расход воздуха 1133 л/мин;
- номинальное давление воздуха 6,9 кгс/см²;
- тепловая мощность 850 Вт;
- размер средний.

Экспериментальные исследования с применением вихревой трубы Nex Flow 50040H были проведены как зарубежными, так и отечественными авторами [11-15]. В результате исследований, представленных в литературе, было установлено, что наивысшая эффективность температурного разделения для данной вихревой трубы достигается при концентрации холодной фракции $\approx 80\%$ и трех полных оборотах регулирующего винта дроссельного устройства. Эксперименты показывают эффект термического разделения потоков данной вихревой трубой с разницей температур в 30 °С при значении давления входного потока, численно равного 2 бар. Дальнейшее увеличение входного давления, соответственно, приводит к увеличению разницы температур между холодным и горячим генерируемыми потоками. Уже при давлении в 5 бар разница температур достигает значения 80 °С. Указанные результаты подтверждают целесообразность использования вихревой трубы Nex Flow 50040H в качестве источника низкопотенциального тепла в составе разработанной экспериментальной установки.

Общее количество термоэлектрических генераторных модулей, использующихся в экспериментальной установке, равняется 39 шт. Габаритные размеры одного модуля составляют (ДхШхВ) 40х40х3,2 мм. Данное количество модулей выбрано с учетом последующего повышения эффективности установки и оптимизации ее конструкции за счет применения вихревых труб большей мощности с большими габаритными характеристиками.

Численное моделирование. С целью повышения эффективности использования тепла горячего и холодного воздушных потоков термоэлектрическими генераторными модулями, в программе ANSYS CFX было выполнено численное моделирование следующих вариантов конструкции профилированных каналов термоэлектрического генератора:

- базовый (канал прямоугольного профиля 92х42 мм);
- с применением варианта интенсификации теплообмена, заключающемся в уменьшении проходного сечения до 92х10 мм и установке в каналах поперечных перегородок, попеременно изменяющих направление воздушных потоков, размером 60х10 мм, с шагом 30 мм, который подробно описан в [16];
- с применением варианта интенсификации теплообмена, заключающемся в уменьшении проходного сечения до 92х10 мм и установке в каналах поперечных перегородок, попеременно изменяющих направление воздушных потоков, размером 60х10 мм, с шагом 60 мм;
- с применением варианта интенсификации теплообмена, заключающемся в уменьшении проходного сечения до 92х7 мм и установке в каналах поперечных перегородок, попеременно изменяющих направление воздушных потоков, размером 60х7 мм, с шагом 60 мм.

При выполнении численного моделирования в программе ANSYS CFX необходимо задать определенные граничные условия. В качестве рабочего тела, поступающего в профилированные каналы, был выбран воздух, т.к. первичные экспериментальные исследования разработанной установки, способствующих верификации полученных результатов, будут проведены с использованием воздуха в качестве рабочего тела.

Режимные параметры холодного и горячего газообразных потоков для приведенного источника низкопотенциального тепла содержатся в паспортных данных вихревой трубы Nex Flow 50040H. Исходные характеристики воздушного потока соответствуют одному из вариантов упомянутых режимных параметров:

- объемный расход холодного потока 566,5 нл/мин;
- объемный расход горячего потока 566,5 нл/мин;
- температура холодного потока -35 °С;
- температура горячего потока +70 °С;
- давление потоков на выходе из профилированных каналов 101325 Па.

В ходе проведенных исследований были вычислены значения поля температур воздушных потоков, потерь давления, поля теплового потока по длине профилированных каналов приведенных конструкций.

В результате численного моделирования были получены следующие данные и зависимости. Распределение температуры, а также значений тепловых потоков по длине профилированных каналов базового варианта конструкции для горячего и холодного воздушных потоков представлено, соответственно, на рис. 3 и рис. 4.

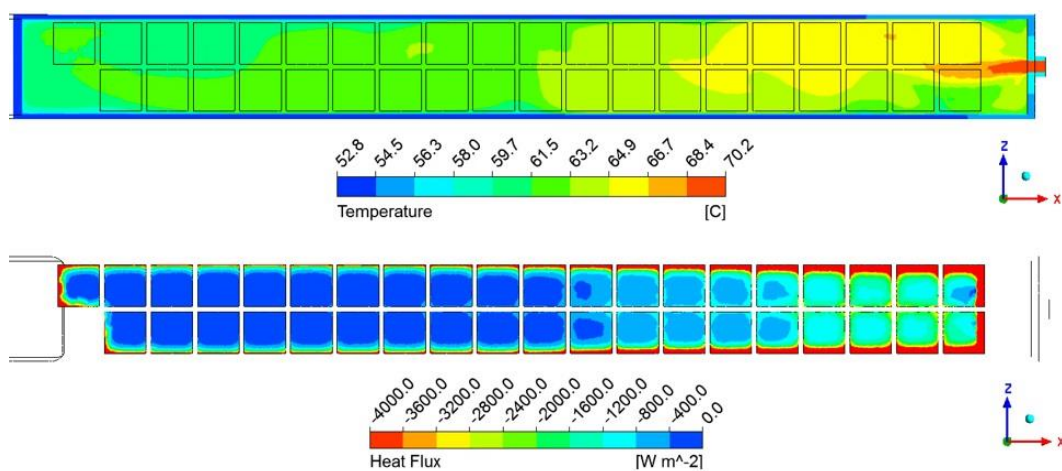


Рис. 3. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала базовой конструкции с горячей стороны

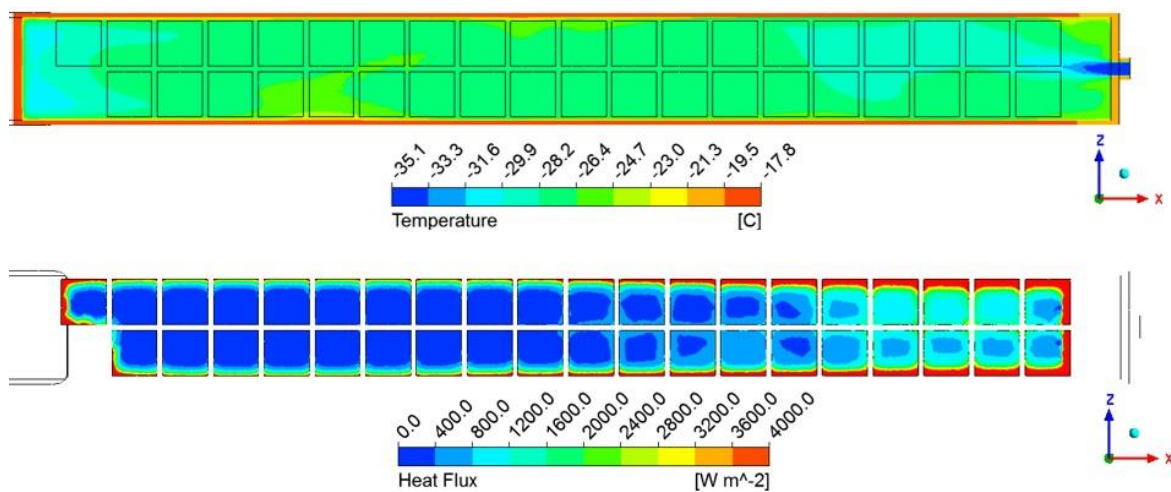


Рис. 4. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала базовой конструкции с холодной стороны

Эффективность работы термоэлектрических модулей и количественное значение сгенерированной ими электрической энергии в основном имеют зависимость от разности температур между противоположными плоскостями самих модулей и количества подведенного и отведенного тепла [17, 18]. Соответственно, с увеличением указанной разности температур растет эффективность работы модулей и численное значение выработанной полезной электрической мощности также возрастает, но, в свою очередь, до определенного предела, который зависит от конструктивных особенностей термоэлектрических генераторных модулей. Также имеется и минимально необходимая разность температур между холодной и горячей поверхностями модуля, при которой он способен генерировать электрическую энергию. Эта разность температур также зависит от конструкции определенного термоэлектрического модуля.

Из полученных распределений параметров (рис. 3 и рис. 4) с горячей и холодной сторон можно определить, что в базовом варианте конструкции канала прямоугольного поперечного сечения выполняется практически равномерное и скоротечное распространение теплового потока по всей внутренней площади канала, при этом происходит значительный рост тепловых потерь за счет устремления тепла к выходной части профилированных каналов. В данных условиях первые девять рядов термоэлектрических модулей, от входного патрубка и по направлению движения потоков, обеспечены определенным значением теплового потока, которого недостаточно для их эффективной работы.

Значения тепловых характеристик потоков по длине профилированных каналов варианта конструкции с интенсификацией теплообмена, заключающейся в уменьшении проходного сечения канала до 92x10 мм и установке в каналах поперечных перегородок, попеременно изменяющих направление воздушных потоков, размером 60x10 мм, с шагом 30 мм, для горячего и холодного воздушных потоков представлено, соответственно, на рис. 5 и рис. 6.

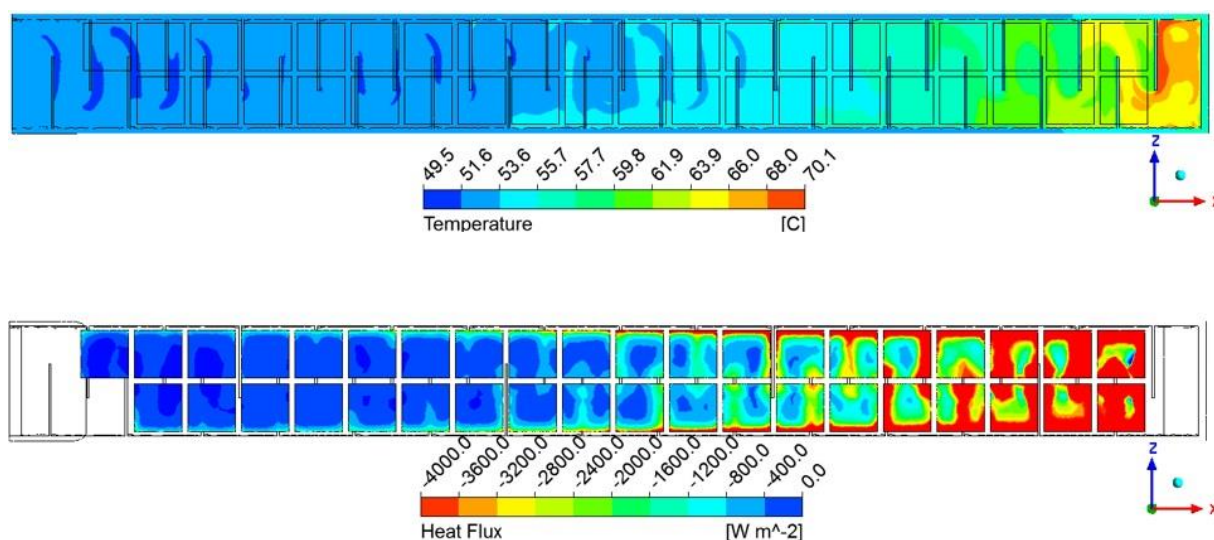


Рис. 5. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала конструкции с перегородками 60x10 мм с шагом 30 мм с горячей стороны

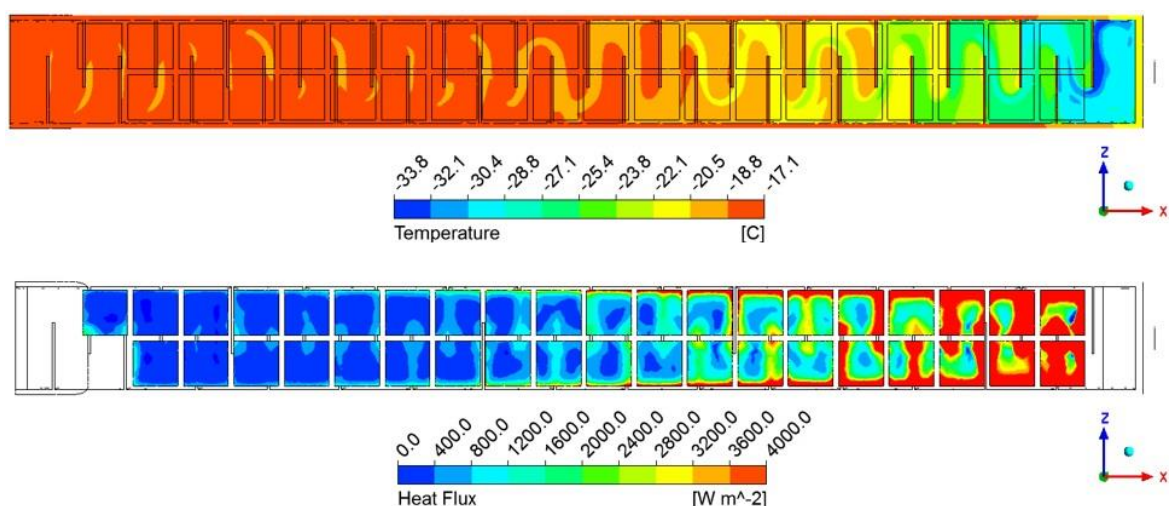


Рис. 6. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала конструкции с перегородками 60x10 мм с шагом 30 мм с холодной стороны

Распределение теплового потока в профилированных каналах прямоугольного поперечного сечения при установке перегородок, способствующих попеременному изменению направления потока, и уменьшению размеров проходного сечения выполняется более равномерно по отношению к стенкам термоэлектрических генераторных модулей. Большая часть теплового потока приходится на первые восемь рядов модулей по ходу движения потока, а разность температур между потоками достигает значений в $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет данным модулям осуществлять генерацию электроэнергии с высокой эффективностью. При этом максимальный перепад давления по длине профилированного канала при данных условиях составляет $51,15\text{ кПа}$.

Значения полей температуры и тепловых потоков по длине профилированных каналов варианта конструкции с интенсификацией теплообмена при тех же параметрах, но с шагом 60 мм, для горячего и холодного воздушных потоков представлены, соответственно, на рис. 7 и рис. 8.

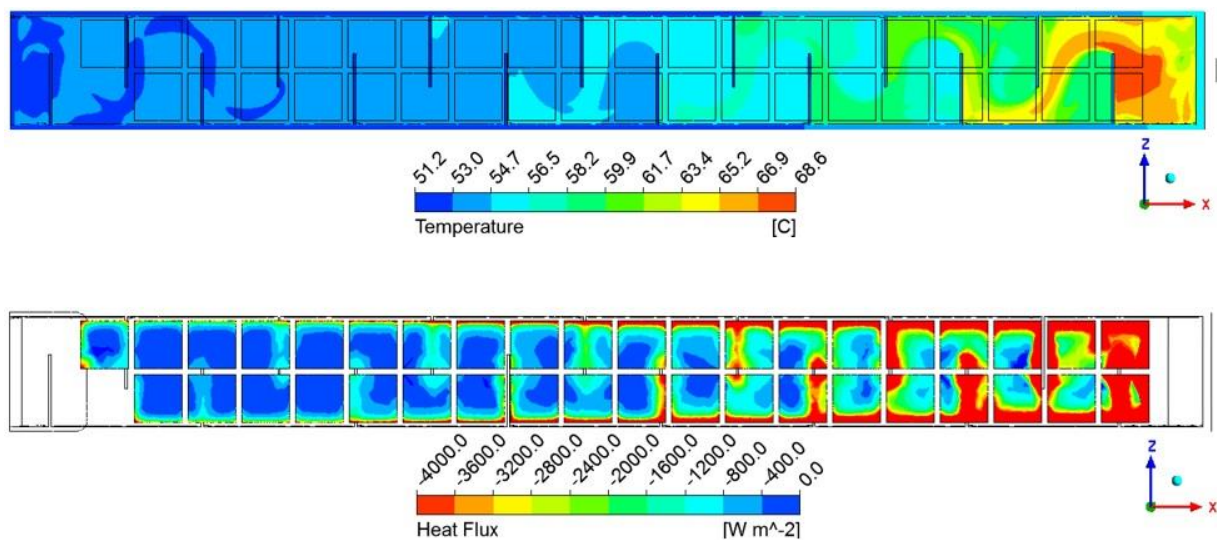


Рис. 7. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала конструкции с перегородками 60x10 мм с шагом 60 мм с горячей стороны

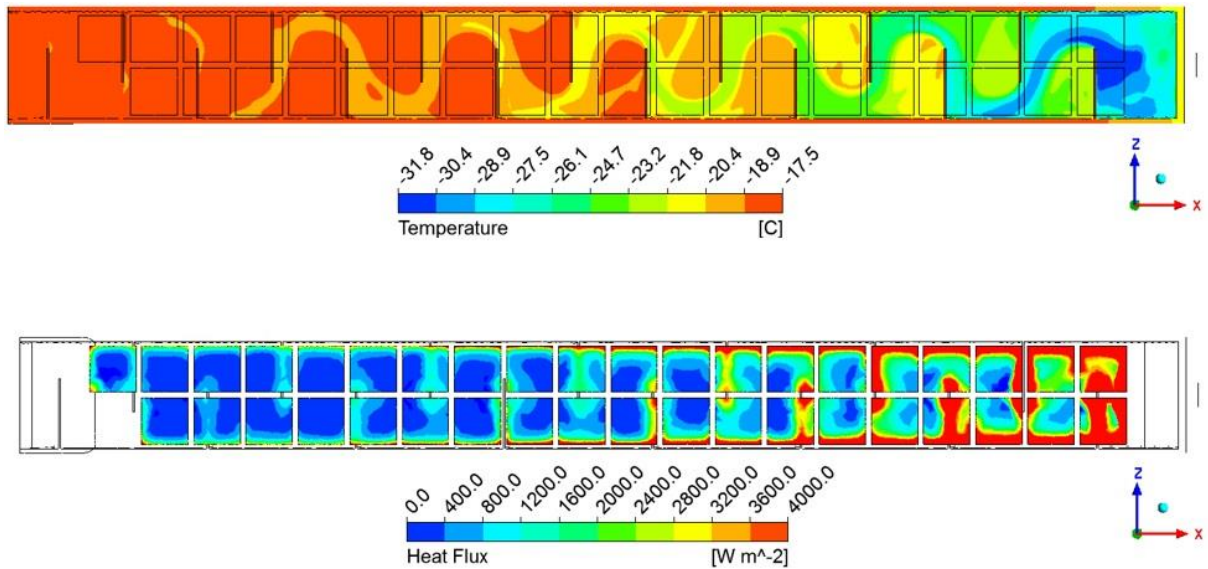


Рис. 8. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала конструкции с перегородками 60x10 мм с шагом 60 мм с холодной стороны

При анализе результатов численного моделирования второго варианта интенсификации теплообмена в профилированных каналах (канал 92x10 мм, перегородки 60x10 мм с шагом 60 мм) можно заметить, что по характеристикам распределения теплового потока и изменения температур потоков по ходу движения в каналах данный вариант не имеет существенного отличия от варианта интенсификации с теми же габаритными характеристиками, но меньшим шагом лопаток (30 мм). При этом второй вариант интенсификации теплообмена является более предпочтительным в связи с тем, что максимальное значение потерь давления для представленного случая составляет 16,96 кПа.

Целесообразно также рассмотреть вариант интенсификации теплообмена с дополнительным уменьшением проходного сечения до размера 92x7 мм и установленными с шагом 60 мм поперечными перегородками, имеющих размер 60x7 мм. Результаты численного моделирования данного варианта для горячего и холодного воздушных потоков показаны, соответственно, на рис. 9 и рис. 10.

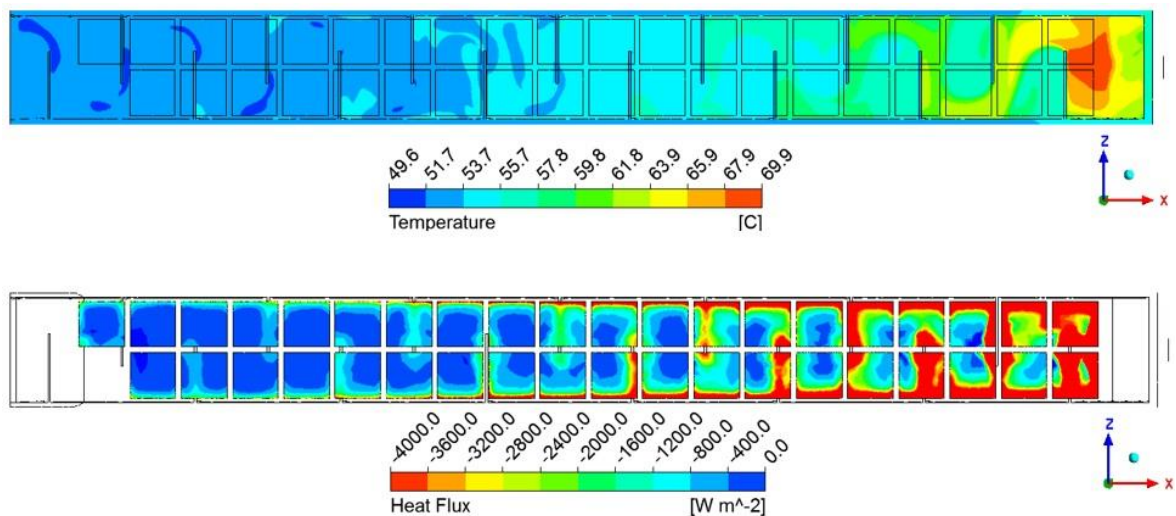


Рис. 9. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала конструкции с перегородками 60x7 мм с шагом 60 мм с горячей стороны

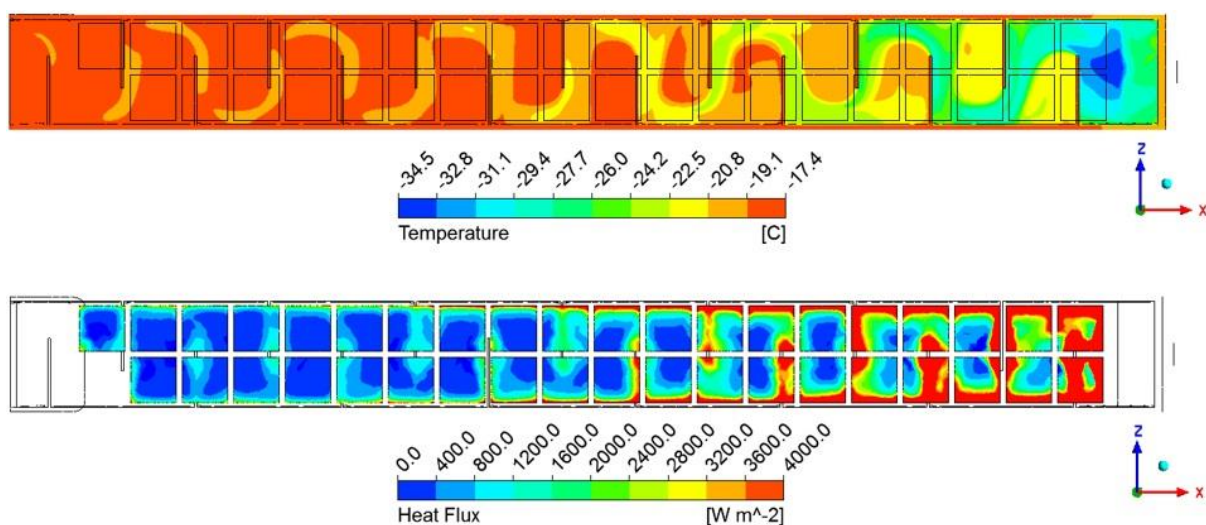


Рис. 10. Распределение температуры воздуха и теплового потока по длине профилированного канала конструкции с перегородками 60x7 мм с шагом 60 мм с холодной стороны

Как можно заметить из полученных зависимостей, вариант интенсификации теплообмена с дополнительным уменьшением проходного сечения до размеров 92x7 мм практически идентичен варианту каналов 92x10 мм с перегородками, установленными с шагом в 60 мм, но при этом имеет максимальный перепад давления среды по длине канала, равный 31,4 кПа.

Выводы. В ходе проведенных исследований было выполнено численное моделирование процессов теплообмена в профилированных каналах термоэлектрической генераторной установки, имеющих прямоугольное поперечное сечение. Численное моделирование проведено для четырех вариантов конструктивного исполнения упомянутых каналов – базового и трех вариантов интенсификации теплообмена, заключающихся в различной степени сужения проходного сечения, а также установке перпендикулярно потокам рабочего тела поперечных сплошных перегородок, попеременно изменяющих направление его движения. По завершению анализа результатов выполненного моделирования можно прийти к выводу о том, что выбранные варианты интенсификации теплообмена способствуют увеличению количества тепловой энергии, переданной термоэлектрическим генераторным модулям, повышению эффективности генерации ими электроэнергии, росту мощности генерируемого тока, а также снижению капиталовложений за счет уменьшения количества необходимых модулей при той же величине электрической мощности, по сравнению с базовым вариантом исполнения. Наиболее энергоэффективным вариантом интенсификации теплообмена с меньшим значением потерь давления по длине каналов из представленных является профилированный канал, имеющий размер 92x10 мм с установленными в нем с шагом в 60 мм поперечными перегородками, размер которых составляет 60x10 мм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lee, Y-L. Metal Fatigue Analysis Handbook: Practical problem-solving techniques for computer-aided engineering / Y-L. Lee, M. E. Barkey, H-T. Kang // ButterworthHeinemann, Elsevier Inc., 2011. – 632 p.
2. Денисов, М. А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование: учебное пособие / М. А. Денисов. – Екатеринбург: Федеральное государственное

- автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. – 149 с.
3. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А. Б. Каплун. – М.: URSS, 2017. – 272 с.
 4. Корякина, М. Л. Оценка возможностей утилизация тепла с помощью термоэлектрических генераторов в условиях Крайнего Севера / М. Л. Корякина // Энергия-2018: Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: в 6 томах (Иваново, 03–05 апреля 2018 года). – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2018. – С. 110.
 5. Ибругимов, Р. И. К вопросу применения термоэлектрических генераторов для решения задач альтернативного электрического питания / Р. И. Ибругимов // Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XII Международной научно-практической конференции молодых ученых (Красноярск, 08–09 апреля 2019 года). – Красноярский государственный аграрный университет, 2019. – С. 161-163.
 6. Гермагенов, С. С. Применение эффекта термоэлектрических элементов на основе законов Пельтье-Зеебека в условиях Крайнего Севера / С. С. Гермагенов, Р. Р. Ноговицын // Colloquium-Journal. – 2019. – № 13-2(37). – С. 30-34.
 7. Сажин, И. Ю. Эффект Зеебека и его применение / И. Ю. Сажин, Е. А. Чабанов, Е. В. Чабанова // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2020. – Т. 1. – С. 404-410.
 8. Создание экспериментальной электрогенерирующей установки с применением вихревого эффекта Ранка-Хилша / Д. А. Базыкин, В. А. Ильичев, В. В. Курасов, А. В. Бараков // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения: труды 24-й научно-технической конференции (Воронеж, 16 июня 2022 года). – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2022. – С. 3-10.
 9. Белоусов, А. М. Исследование возможностей повышения энергоэффективности вихревой трубы Ранка – Хилша / А. М. Белоусов, И. Х. Исрафилов, С. И. Харчук // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 7-2. – С. 112-121.
 10. Эксплуатация регулируемых вихревых труб Ранка-Хилша в экологически значимых промышленных установках очистки газов (аналитический обзор) / В. А. Девисилов, Д. А. Жидков, В. С. Спиридонов, О. В. Кирикова // Экология и промышленность России. – 2013. – № 12. – С. 14-19.
 11. Chatterjee, M. 1-D model for mass transfer calculation in vortex tube using heat and mass transfer analogy / M. Chatterjee, S. Mukhopadhyay, P. K. Vijayan // American Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – V. 4. – № 1. – P. 1-24. – DOI 10.7726/ajhmt.2017.1001.
 12. Rafiee, S. E. Three-dimensional computational prediction of vortex separation phenomenon inside the Ranque-Hilsch vortex tube / S.E. Rafiee, M. B. M. Sadeghiyazad // Aviation. – 2016. – V. 20. – № 1. – P. 21-31. – DOI 10.3846/16487788.2016.1139814.
 13. Chatterjee, M. Experimental study of heat and mass transfer in RanqueHilsch Vortex tube / M. Chatterjee, S. Mukhopadhyay, P. K. Vijayan // Int J Adv Res. – 2016. – V. 4. – № 7. – P. 665-674. – DOI 10.21474/IJAR01.
 14. Коновалов, В. И. Разработка расчета вихревых труб Ранка-Хилша / В.И. Коновалов, А. Ю. Орлов, К. Т. Кудра // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 74-107.
 15. Орлов, А. Ю. Влияние конструктивных особенностей вихревых труб на параметры процесса термосепарации / А. Ю. Орлов, Н. В. Орлова, М. В. Савушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19. – № 3. – С. 619-624.
 16. Численное моделирование интенсификации теплообмена в каналах термоэлектрической генераторной установки / Д. А. Базыкин, В. А. Ильичев, Е. А. Орехов, А. В. Бараков // Энергетические системы. – 2022. – № 3. – С. 8-16. – DOI 10.34031/ES.2022.3.001.
 17. Лемминг, А. Э. Решение задач энергетического обеспечения автономных объектов на основе термоэлектрических модулей / А.Э. Лемминг, П.Г. Шостаковский // Инновации. – 2018. – № 5(235). – С. 9-13.
 18. Шостаковский, П. Г. Современная промышленная термоэлектроэнергетика / П. Г. Шостаковский // Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 1. – С. 8-17.

Поступила в редакцию 27.02.2024 г., рекомендована к печати 14.03.2024 г.

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER AND OPTIONS FOR ITS INTENSIFICATION
IN PROFILED CHANNELS OF THERMOELECTRIC GENERATOR INSTALLATION

Bazykin D.A., Dakhin S.V., Barakov A.V.

The article discusses a technical solution consisting in numerical modeling of the intensification of heat exchange in autonomous power plants used to generate electricity in areas significantly removed from the centralized infrastructure, which have their own energy resources. The design and principle of operation of an experimental installation created for the purpose of studying operating modes and optimizing the design are described. The results of numerical modeling of heat transfer processes in the channels of the specified installation and various options for its intensification are presented. The selected options contribute to an increase in the amount of thermal energy transferred to thermoelectric generator modules, an increase in the power of the generated current, as well as a reduction in capital investments by reducing the number of modules with the same amount of electrical power, compared to the basic version.

Keywords: thermoelectric generator modules, Seebeck effect, Ranque-Hilsch effect, power plant, electricity generation, partitions, numerical modeling, heat transfer, channels, rectangular cross section.

Базыкин Денис Александрович

аспирант кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: bazykin.denis@yandex.ru

Bazykin Denis Aleksandrovich

Postgraduate student at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Дахин Сергей Викторович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: svdakhin@ya.ru

Dakhin Sergei Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Барakov Александр Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: pt_vstu@mail.ru

Barakov Aleksandr Valentinovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО СПОСОБА
ОБОГАЩЕНИЯ КИСЛОРОДОМ НЕДОСТАТОЧНО ОЧИЩЕННЫХ
СТОЧНЫХ ВОД

© 2024 Хуррамова Н.М., Хуррамов М.Г., Джураева Н.Б.

В статье предложен надежный и безопасный в экологическом отношении, экономически целесообразный первичный способ обогащения кислородом не прошедших достаточной очистки сточных вод. Способ состоит из приемного резервуара, который построен водорослевым известняком в Гиссарскую горную породу. Известняк в резервуаре способствует улучшению кислородного режима за счёт «консервации» органического вещества, в бескислородных донных слоях и ускорению процесса фотосинтеза одноклеточных водорослей. В результате содержание растворенного кислорода в стоке увеличивается по выходу из резервуара до 1,3-1,4 мгО₂/дм³.

Ключевые слова: способ, недостаточно очищенные стоки, приемный резервуар, водорослевой известняк, обогащение кислородом.

Введение. В настоящее время почти на все водные объекты оказываются под антропогенным влиянием, особенно на водоемы, находящиеся близ промышленных зон. Больше всего страдают мелководные объекты, не имеющие высокой разбавляющей и самоочищающей способности. Это особенно вредно сказывается при «залповых выбросах», не прошедших достаточной очистки сточных вод. Поэтому важно вовремя проводить мероприятия, позволяющие в полной мере оценивать показатели воды, которые непосредственным образом оказывают влияние на жизнь водоёма и его обитателей. Одним из таких показателей является кислород. Большинство живых существ испытывают необходимость в кислороде и его соединениях, обитатели водоёмов не исключения - концентрация кислорода в воде является важным показателем благополучия. Постоянное присутствие растворенного кислорода в поверхностных водах характеризует кислородный режим водоёмов и имеет первостепенное значение для оценки санитарного и экологического состояния. В свою очередь, истощение растворенного кислорода в системах может способствовать микробиологическому восстановлению нитрата в нитрит и сульфата в сульфид, что вызывает появление запаха [1-6].

Обогащение сточных вод кислородом – один из важнейших этапов подготовки стоков к сбросу в очистки или водоёмы. Одним из перспективных решений является использование энерго- и ресурсосберегающих способов обогащения, не прошедших достаточной очистки сточных вод кислородом [3, 7-11].

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка энерго- и ресурсосберегающего способа первичного обогащения не прошедших достаточной очистки сточных вод кислородом.

Экспериментальные методы. Для решения поставленных задач использовались химические анализы проб стоков, отобранных в полевых условиях, которые проводились в лаборатории кафедры «Химия» Каршинского государственного университета.

При определении содержания растворенного кислорода в стоке использовалось йодометрическое титрование – метод Винклера, широко используемый и общепринятый при санитарно-химическом и экологическом контроле. Полевые опыты проводились согласно стандартным методикам, установленным правилам контроля качества воды водоемов физическим и химическим показателям. Измерения проведены в соответствии с нормативно-технической документацией [1, 2, 12-16].

Результаты и их обсуждение. Объектом исследования послужила сточная вода из промышленной зоны г. Шахрисабза. Схема очистки сточных вод зоны включает последовательную механическую очистку. Объем сброса сточных вод, согласно, графика выпуска сточных вод составляет 2000 м³/сутки. Категория: производственные сточные воды. Исходные сточные воды, представляют собой смесь стоков от мелких промышленных предприятий: текстильной, молочной, пищевой, металлообрабатывающих, аккумуляторных и гальванических цехов. Все сточные воды, образующиеся на территории промышленной зоны после механической очистки, транспортируются по закрытому трубопроводу к месту спуска в мелководное р. «Кара-сув» на расстояние 2,5 км. Конструкция выпуска сточных вод промплощадки предприятий в водоем затопленная.

С целью получения наиболее показательных результатов измерения концентраций растворенного кислорода в сточной воде было выбрано 10 мест опробования, на различных расстояниях от выпуска. После того как проведен предварительный анализ лабораторных результатов при сбросе в мелководную р. «Кара-сув», некоторые показатели качества воды, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Показатели качества общезаводских очистных сооружений сбрасываемой воды в р. «Кара-сув»

Определяемые показатели	Единица измерения	Количества	ПДК
Водородный показатель	единиц рН	7,5-9,5	6,5-7,5
Взвешенные вещества	мг/дм ³	225 ± 10	15
Растворенный кислород	мгО ₂ /дм ³	0,1 ± 0,05	4,0
БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	460 ± 5	2,0
ХПК	мгО ₂ /дм ³	600±35	30

Анализ данных таблицы 1 показывает, что средняя концентрация растворенного кислорода в сбросе в мелководный р. «Кара-сув» составляет 0,1±0,05мгО₂/дм³. Основные показатели качества воды, приведенные в таблице, не соответствуют нормативным значениям ПДК. Общезаводские очистные сооружения предприятий работают неэффективно. Из вышеизложенного можно сделать вывод о достаточно сильном их влиянии на степень загрязнения воды в реке. Особенно заметно увеличение значений таких показателей, как ХПК на 25% и БПК₅ на 56%. В настоящее время самоочищающей способности мелководного р. «Кара-сув» уже не хватает, и она не в силах переработать все поступающие загрязнения.

Для изучения картины приемного резервуара и конструктивных параметров его была разработана полевая экспериментальная установка. Эксперименты проводились прямо в назначенных местах сброса. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1.



Рис.1. Общий вид экспериментальной установки:
1-труба для подачи паток недоочищенных стоков; 2-отверстия; 3-струи стоков;
4-приемная яма для стока

Недоочищенный сток самотеком со скоростью до 1,0 м/с, через трубы ($d=50\text{мм}$) поступает в приемную яму, которые установлены на 0,8 м выше уровня воды в стойках. Глубина приемного резервуара 0,5 м, уклон 0,005, имеющий прямоугольную форму. Для слива очищаемых вод и принудительной аэрации в днище разводящих труб имеются отверстия диаметром 8-15 мм, расстояние между которыми 0,25 м. Для более равномерного перемешивания очищаемых вод отверстия в сети расположены в шахматном порядке, таким образом, чтобы перемешивающие площади, соседними отверстиями, частично перекрывались. За счет свободного падения из отверстия очищаемых сточных вод с высотой 0,8 м осуществляется начального распада струи, при котором струя распадается на отдельные. За счет раздробления струи на отдельные увеличится площадь поперечного сечения струи, в результате мельчайшие капли сточной воды, контактируя с кислородом воздуха, насыщаются им в процессе диффузии. Этот метод весьма прост и эффективен, не требует энергозатрат и больших площадей.

На основе полученных результатов экспериментальной установки, была выбрана конструкция приемного резервуара открытого типа для слива стоков (рис. 2). Исходя этого проведен расчет размера габаритов приемного резервуара [7, 9, 17-20].

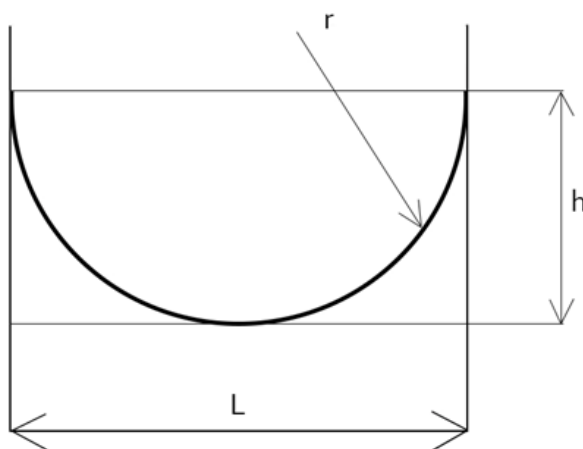


Рис. 2. Расчетная схема приемного резервуара

При практических расчетах габарита приемной ямы использовались следующие параметры: ширина по дну L ; глубина наполнения h ; радиус окружности r .

Гидравлическая характеристика приемного резервуара определяется его наибольшей пропускной способностью при заданном уклоне и площади сечения. Гидравлический радиус приемного резервуара определяется уравнением:

$$R = \omega / \chi ,$$

где ω – площадь живого сечения потока сточных вод в приемном резервуаре (по СНиП 31.02.2001, $\omega = 1,7r^2$); χ – смоченный периметр приемного резервуара определяется уравнением:

$$\chi = 2\pi r ,$$

где r – радиус сечения сточных вод.

В основе гидравлического расчета принято: постоянство расхода сточных определяется уравнением:

$$q = \omega \cdot v ,$$

где ω – площадь живой сечения потока сточных вод приемной резервуара; v – скорость течения сточных вод приемной резервуара м/сек;

Средняя скорость течения сточных вод приемной резервуара в м/сек определяются уравнением Шези:

$$v = C\sqrt{R} ,$$

где R – гидравлический радиус приемного резервуара, в м; C – коэффициент сопротивления трения по длине; I – гидравлический уклон потока сточных вод, определяемый уравнением:

$$I = \frac{v^2}{C^2 R} .$$

Коэффициент сопротивления трения по длине приемного резервуара определяются уравнением Н.Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y ,$$

где n – коэффициент шероховатости, принимаемый для материала приемного резервуара (для водорослевого известняка равно $0,0015 \div 0,017$); y – показатель степени, зависящий от величины коэффициента шероховатости и гидравлического радиуса приемного резервуара, определяются уравнением:

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1) .$$

В канализационных коллекторах диаметром до 4000 мм, гидравлический радиус всегда меньше 1 м, а при $R < 1$ и $n = 0,013$ показатель степени определяются уравнением:

$$y \approx 1,5\sqrt{n} = \frac{1}{6} .$$

По данным СНиП 31.02.2001 величину без размерного коэффициента сопротивления λ для безнапорного течения рекомендуются определять по формулам Н.Ф. Федорова:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -21g \left(\frac{\Delta_3}{13,68R} + \frac{a_2}{Re} \right),$$

где Δ_3 – эквивалентная абсолютная шероховатость в см, (для водорослевого известняка равно 0,64 см); a_2 – безразмерный коэффициент, учитывающий характер шероховатости материала приемный резервуара (для водорослевого известняка равно 50); R – гидравлический радиус приемный резервуара, в см; Re – число Рейнольдса;

На основе выполненных расчетов определены параметры приемного резервуара. Таким образом, конструкция представляет собой резервуар открытого типа размерами $A \times B \times H = 8000 \times 4000 \times 1300$ мм, режим самотечный.

Оптимальная продолжительность пребывания насыщаемых кислородом сточных вод в резервуаре 40-45 мин. При этом скорость течение паточа установлена 1,2–1,3 м/с, для предохранения его от заливания. Во избежание размыва для загрузки на дно в качестве слоя использовали 500-700 мм куски водорослевого известняка Гиссарской горной породы, сравнительно низкой стоимостью и доступностью. На основании лабораторного анализа определен, химический состав водорослевого известняка Гиссарской горной породы в %:

SiO₂-5,2; TiO₂-0,05; Al₂O₃-0,8; Fe₂O₃+FeO-0,55; MnO-0,05; CaO-43,0; MgO-8,0; K₂O-0,3; Na₂O-0,05; H₂O-0,75; P₂O₅-0,04; CO₂-41,5; SO₃-0,04; S-0,08.

Химический состав в качестве ионообменного материала удовлетворяет требованиям к процессам очистки стоков своими свойствами. Загрузка известняка в приемный резервуар способствует улучшению кислородного режима за счёт «консервации» органического вещества в бескислородных донных слоях и ускоряет процесс фотосинтеза одноклеточных водорослей. Водоросли поглощают питательные вещества всей своей поверхностью.

Карбонат кальция является реагентом, обеспечивающим не только автоматическую стабилизацию pH воды на уровне <8,5, но и обладает высокой степенью удаления тяжелых металлов из воды (на примере Cu²⁺, Pb²⁺ и Cd²⁺) (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Общий вид приемного резервуара: а) нижний слой из известняка Гиссарской горной породы; б) процесс насыщения кислородом стоков в приемном резервуаре

Как видно из рисунка 3б, происходит как обогащение массы стоков кислородом, так и дробление пузырьков при сдвигании слоёв стока, что в целом заметно ускоряет и облегчает весь процесс. Визуальная оценка показывает, что в приемном резервуаре создается постоянное движение стока обогащения кислородом (активная зона в резервуаре до 100%), что обеспечивает равномерное распределение кислорода по всей толще стока. Что в свою очередь позволяет улучшить насыщение обрабатываемых сточных вод кислородом. Создание оптимальных гидродинамических условий полного самотечного смешения потока сточной воды является важнейшим условием успешного процесса обогащения кислородом. При этом, основное назначение быстрой турбулизации потока – как можно более полное и быстрое распределение растворенного кислорода в массе стока. При высоких скоростях течения стоков в начальном участке резервуара происходит нарушение сплошности свободной поверхности потока стока, она становится рыхлой и воздух захватывается в стоке. При проникновении пузырьков воздуха в стоке образуется зона течения водовоздушной смеси.

В этом участке приемного резервуара средняя скорость потока V должна быть равна критической скорости $V_{кр}$, определяемой по формуле:

$$V = \sqrt{0,38R \cos a_n \cdot \lambda_R},$$

где R - гидравлический радиус; a_n - угол наклона сливной грани водосброса; λ_R - коэффициент гидравлического трения его поверхности.

Анализ полученных данных показал, что концентрация растворенного кислорода в поверхностном слое постепенно увеличивалась и местами до хвостовой части резервуара достигала 1,3-1,4 мгО₂/дм³, в пробе, отобранной до 12 часов дня (рис. 4).



Рис. 4. Сброс стока насыщенным кислородом из резервуара

Выводы. Главными достоинствами такого способа являются дешевизна процесса, отсутствие потребности в электроэнергии, простота строительства и отсутствие необходимости в содержании эксплуатационного персонала. В результате содержание растворенного кислорода можно увеличить по выходу из приёмного резервуара до 1,3-1,4 мгО₂/дм³. Предварительное перемешивание потоков в сбросе оказывает положительное влияние на экологию и санитарное состояние водоёмов. Полученные результаты могут использоваться для создания доступных технологий в этой области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трифонова, Т. А. Антропогенная нагрузка на речной бассейн / Т. А. Трифонова, А. С. Сенатов // ЭКВАТЕК-2002. Вода: экология и технология: сборник материалов конгресса (Москва, 04–07 июня 2002 года). – Москва: Ренел-Принт, 2002. – С. 14-15.
2. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03. – М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2003. – 154 с.
3. Кислородный режим рек как показатель продукционно-деструкционных процессов в реках / А. В. Гончаров, М. Б. Заславская, В. А. Исаев [и др.] // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: материалы V Всерос. симпоз. (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 года). – Петрозаводск: Изд-во Карельский научный центр РАН, 2012. – С. 216-218.
4. Николаев, А. Н. Очистка сточных вод до требований экологических нормативов на сбросе в водоемы / А. Н. Николаев, Е. М. Крючихин // Экология и промышленность России. – 2003. – № 7. – С. 17-20.
5. Сенатов, А. С. Самоочищающая способность речного бассейна / А. С. Сенатов // Экология речных бассейнов: Труды второй Международной науч.-практич. конф. – Владимир: ВГУ, 2002. – С. 243.
6. Оценка параметров самоочищения малых рек центра Красноярского края / О. В. Тасейко, Т. П. Спицына, Р. Р. Тагиров [и др.] // Моделирование неравновесных систем - 2013 : материалы XVI Всероссийского семинара (Красноярск, 04–06 октября 2013 года). – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. – С. 166-170.
7. Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов / Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. – М.: Издательство ассоциации вузов, 2006. – 704 с.
8. Ивченко, Л. В. Экспериментальные исследования насыщения сточных вод кислородом в каналах / Л. В. Ивченко // Молодые ученые-аграрной науке и производству: Сборник научных работ молодых ученых-аграриев Центрального федерального округа (Брянск, 25–26 ноября 2003 года). – Вып. 1. – Брянск: Брянская государственная сельскохозяйственная академия, 2003. – С.126-127.
9. Карпухина, Л. А. Проекты решения по строительству сооружений обеззараживания сточных вод / Л. А. Карпухина // ЭКиП: Экология и промышленность России. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
10. Кунахович, В. А. Сооружения для очистки поверхностного стока: правильный выбор / В. А. Кунахович // Экология производства. – 2012. – № 4. – С. 50–53.
11. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
12. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору: межгосударственный стандарт: дата введения 2014-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 35 с.
13. Лабораторный практикум по водоотведению и очистке сточных вод / Ю. М. Ласков, В. И. Калицун, Ю. В. Воронов [и др.]. – М.: Стройиздат, 2000. – 188 с.
14. Методика по определению расчетных расходов воды и стоков в системе водоснабжения и канализации зданий и сооружений: методическое пособие / А. Я. Шарипов, А. С. Богаченкова, Н. А. Александрович [и др.]. – М.: ООО «СанТехПроект», 2017. – 117 с.
15. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод: рекомендации. Р 52.24.353-2012. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2012. – 39 с.
16. Методика выполнения измерений массовой концентрации растворённого кислорода в пробах природных и сточных вод йодометрическим методом. ПНД Ф 14.1:2:3.101-97. – М.: АСВ, 2017. – 27 с.
17. Алексеев, М. И. Гидравлический расчет сетей водоотведения: справ. пособие / М. И. Алексеев, Ф. В. Кармазинов, А. М. Курганов. – СПб.: НТО спец. гор. хоз-ва СПб., 1997. – 128 с.
18. Лукиных, А. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н. Н. Павловского: справ. пособие/ А. А. Лукиных, Н. А. Лукиных. – М.: ООО «ИД «БАСТЕТ», 2011. – 380 с.
19. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования: Свод правил. СП 40-102-2000. – М.: Госстрой России, 2001. – 38 с.
20. Помогаева, В. В. Повышение эффективности струйной аэрации естественных водоёмов и биологических прудов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Помогаева Валентина Васильевна; ВГАСУ. – Москва, 2009. – 176 с.

Поступила в редакцию 30.01.2024 г., рекомендована к печати 21.02.2024 г.

INVESTIGATION OF AN ENERGY-RESOURCE-SAVING METHOD FOR OXYGEN ENRICHMENT OF INSUFFICIENTLY TREATED WASTEWATER

KHurramova N.M., KHurramov M.G., Dzhuraeva N.B.

The article proposes a reliable and environmentally safe, economically feasible primary method for enriching wastewater that has not undergone sufficient treatment with oxygen. The method consists of a receiving tank, which is built with algal limestone in the Gissar rock. Limestone in the tank helps improve the oxygen regime due to the «conservation» of organic matter in oxygen-free bottom layers and accelerates the process of photosynthesis of unicellular algae. As a result, the content of dissolved oxygen in the drain increases at the exit from the reservoir to 1,3-1,4 mgO₂/dm³.

Keywords: method, insufficiently treated, wastewater, receiving tank, algal limestone, oxygen enrichment.

Хуррамова Наргиза Мухторовна

ассистент кафедры технологического образования
Каршинского государственного университета,
Узбекистан, г. Карши.
E-mail: nargiza-xurramova@mail.ru

KHurramova Nargiza Mukhtorovna

Assistant at Department of Technological education
of Karshi State University,
Uzbekistan, Karshi.

Хуррамов Мухтор Гулович

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры технологического образования
Каршинского государственного университета,
Узбекистан, г. Карши.
E-mail: khurramov58@mail.ru

KHurramov Mukhtor Gulovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor at Department of
Technological education of Karshi State University,
Uzbekistan, Karshi.

Джураева Нигина Баходировна

студент Шахрисабзского государственного
педагогического института,
Узбекистан, г. Шахрисабз.
E-mail: doniyordjuraev290@gmail.com

Dzhuraeva Nigina Bakhodirovna

Student of Shakhrisabz State Pedagogical Institute,
Uzbekistan, Shakhrisabz.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.g@mail.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
 - **Размер бумаги:** А4.
 - **Ориентация:** книжная.
 - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
 - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
 - **Междустрочный интервал:** одинарный.
 - **Абзацный отступ:** 1 см.
 - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *фамилия(и) и инициалы автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г., рекомендована к печати xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *фамилия(и) и инициалы автора(ов)*, аннотация и ключевые слова (*Keywords*) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
- **Фамилия, имя, отчество;**
- ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
- страна, город;
- адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 681.5:621.377

ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ АСНИ КОНТРОЛЯ РАДИООБСТАНОВКИ

© 2024 Третьяков И.А., Данилов В.В.

Приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиобстановки на основе эхо-эффекта. Приведен механизм формирования фоновой эхо.

Ключевые слова: АСНИ, радиобстановка, эхо-эффект, фоновый эхо, обработка радиосигналов.

Введение. Важнейшим элементом современной концепции [1-3] ...

Механизм формирования сигналов. Электрическая компонента первого [4] ...

Выводы. Таким образом, рассмотренные элементы позволяют ...

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиобстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
2. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PHCERN.
3. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс] / Studbooks : [Сайт]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 25.01.2024).

Поступила в редакцию xx.xx.2024 г., рекомендована к печати xx.xx.2024 г.

ELEMENTS OF COMPUTING DEVICES FOR ASRS CONTROL OF RADIO PLACEMENT

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

The descriptions of the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the echo effect are given. The mechanism of phonon echo formation is given.

Keywords: ASRS, radio substitution, echo effect, phonon echo, radio signal processing.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиопроизводства и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиопроизводства и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

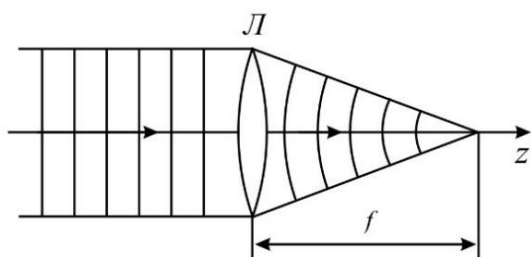


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Ответственный секретарь: Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

Контактный тел.: +7 (856) 302 07 81

Е-mail: vestnik.g@mail.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2024. – № 1.

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

Адрес редакции:

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

Тел.: +7 (856) 302 07 81.

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано в печать 29.03.2024 г.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 12,09.

Тираж 100 экз.

Бесплатно.

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.

Тел.: +7 (856) 302 92 27.