

DOI 10.15589/jnn20160415  
УДК 681.5:629.584  
А51

**GROUP MOTION CONTROL ORGANIZATION  
TASKS OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES  
IN MARITIME SEARCH OPERATIONS**

**ЗАДАЧИ ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ  
АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ  
В ПОИСКОВЫХ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЯХ**

**Aloba Leo Tosin, postgraduate**  
aloba.leo.tosin@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-0509-8129

**Алоба Лео Тосин,**  
асп.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова. г. Николаев*

**Abstract.** This paper investigates the organization of group motion control tasks of autonomous uninhabited underwater vehicles in marine search operations. The paper deals with one of the common questions of preparation for sea operations — method of estimating the required number of search AUVs in a group of one-type and multi-type AUVs by the speeds of the AUVs in the group and the destination of the starting points on the search path by a common Archimedean spiral, that the group's AUVs should occupy before the underwater search begins. Using the principles of the Archimedean spiral, the formulas, for calculating the numbers of vehicles and the time needed for the operations, are formulated after which the correctness of these formulas were tested with examples for verification and implementation of three main options for the search with given specified time intervals, without limiting the number of the attractive one-type AUVs in the group; when the limited amount involved in the same type of AUVs in the group and; thirdly when there is a limited number of multi-type AUVs by motion speeds in the group. This paper is very suitable to serve as a convenient reference and also highlights some areas for the further research on group motion control of teams of AUV for maritime search operations or monitoring and underwater survey.

**Keywords:** one-type AUV; multi-type AUV; group of autonomous underwater vehicle (AUV); group control; group motion; maritime search operation; Archimedean spiral; operational time of search; underwater maritime search vehicles.

**Аннотация.** В настоящей статье исследуется организация задачи управления групповым движением автономных необитаемых подводных аппаратов в поисковых морских операциях. В работе рассматривается один из общих вопросов подготовки к морской операции — методика оценки необходимого количества поисковых АНПА в группе однотипных и разнотипных по скорости движения АНПА в группе и назначение стартовых точек на поисковой траектории по общей спирали Архимеда, которые должны занять АНПА группы перед началом подводного поиска. Используя принципы архимедовой спирали, сформулированы формулы для расчета и выполнения оценки потребного количества АНПА и время, необходимое в поисковой операции для трех основных вариантов организации поиска.

**Ключевые слова:** группа автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА); групповое управление; групповое движение; поисковые морские операции; спирали Архимеда; заданное операционное время поиска; подводные поисковые аппараты.

**Анотація.** У цій статті досліджується організація завдання управління груповим рухом автономних незаселених підводних апаратів в пошукових морських операціях. У роботі розглядається одне із загальних питань підготовки до морської операції — методика оцінки необхідної кількості пошукових АНПА в групі однотипних і різнотипних за швидкістю руху АНПА в групі і призначення стартових точок на пошуковій траєкторії по загальній спіралі Архімеда, які повинні зайняти АНПА групи перед початком підводного пошуку. Використовуючи принципи Архімедової спіралі, сформульовані формули для розрахунку і виконання оцінки необхідної кількості АНПА і час, необхідний у пошуковій операції для трьох основних варіантів організації пошуку.

**Ключові слова:** група автономних незаселених підводних апаратів (АНПА); групове управління; групове рух; пошукові морські операції; спіралі Архімеда; заданий операційний час пошуку; підводні пошукові апарати.

## REFERENCES

- [1] Blintsov V. S., Aloba L. T., Doan F. T. *Sovremennye zadachi gruppovogo upravleniya dvizheniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov* [Modern problems of group motion control of remotely operated underwater vehicles]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2016, no. 3, pp. 91–99.
- [2] Veltishchev V. V., Yegorov S. A., Kropotov A. N. *Osobennosti razrabotki navigatsionnogo obespecheniya gruppirovki avtonomnykh neobitaemykh apparatov* [Features of the development of navigational support for ROV group] *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied hydrophysics], 2014, chapter 7, no. 2, pp. 41–45.
- [3] Kiselev L. V., Bychkov I. V., Maksimkin N. N., Nagul N. V., Kenzin M. Yu., Kozlov R. I., Ulyanov S. A. *Metody i podkhody k resheniyu zadach gruppovogo upravleniya avtonomnymi podvodnymi apparatami* [Methods and approaches to the solve the group tasks of autonomous underwater vehicles management]. *Sovremennye problemy prikladnoy matematiki i mekhaniki: teoriya, eksperiment i praktika: materialy Mezhdunar. konf., posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya akad. N. N. Yanenko (Novosibirsk, Rossiya, 30 maya — 4 iyunya 2011 g.)* [Modern Problems of Applied Mathematics and Mechanics: Theory, Experiment and Applications: Proceedings of Intern. Conf., dedicated to the 90th anniversary of acad. Yanenko (Novosibirsk, Russia, May 30 — June 4, 2011)]. Novosibirsk, IVT SO RAN Publ., 2011, pp. 37–38.
- [4] Kiselev L. V., Inzartsev A. V., Bychkov I. V., Maksimkin N. N., Khmelnov A. Ye., Kenzin M. Yu. *Situatsionnoe upravlenie gruppirovkoy avtonomnykh podvodnykh robotov na osnove geneticheskikh algoritmov* [Contingency management of autonomous underwater robots grouping based on genetic algorithms]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2009, pp. 34–43.
- [5] Tufanov I. Ye. *Metody resheniya obzorno-poiskovykh zadach s primeneniem grupp avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov* Associate prof. diss [Methods for solving the surveillance and search tasks using groups of autonomous underwater vehicle]. *Institut problem morskikh tekhnologiy DVO RAN* [Institute of marine technologies problems RAS]. Vladivostok, 2014.
- [6] Tufanov I. Ye., Shcherbatyuk A. F. *Razrabotka algoritmov gruppovogo povedeniya ANPA v zadache obsledovaniya lokalnykh neodnorodnostey morskoy sredy* [Development of algorithms of group behavior in the problem of AUV survey of local inhomogeneities of the marine environment]. *Upravlenie bolshimi sistemami* [Large systems managing], 2012, no. 36, pp. 262–284.
- [7] Michael Wooldridge *An Introduction to Multi Agent Systems*. JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002. 348 p.
- [8] *Multi-Robot Systems, Trends and Development*, Edited by Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura. Published by InTech, 2011. 586 p.
- [9] Zongrui Huang, Daqi Zhun, Bing Sun *A multi-AUV cooperative hunting method in 3-D underwater environment with obstacle*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, pp. 192–200.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Групповое движение автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является эффективным способом выполнения поисковых морских операций и применяется при необходимости оперативного обследования больших акваторий [8]. Согласованное движение группы из нескольких АНПА в таких операциях относится к типовым технологиям подводного поиска и организуется в виде синхронного движения отдельных АНПА (агентов группы) по выделенным заранее участкам общей для них траектории или по отдельным траекториям с целью одновременного завершения поиска всеми агентами [9].

На этапе планирования поисковых морских операций при этом необходимо решить ряд задач по обеспечению требуемой эффективности применения АНПА, в частности, по обеспечению заданной производительности поисковых работ. Такое планирование

выполняется на верхних уровнях управления группой АНПА, а его результаты используются как исходные данные для нижних уровней группового управления.

В частности, актуальным является вопрос оценки необходимого количества АНПА в поисковой группе, организации работ при ограниченном количестве АНПА в группе и с учетом их индивидуальных технических характеристик. Заметим, что такие расчеты являются неотъемлемой частью функционирования систем автоматического управления группой АНПА, так как во время выполнения подводной миссии количество одновременно работающих АНПА может существенно меняться. Причиной оперативного изменения числа работающих АНПА могут быть отказы или потери части АНПА в группе, а также оперативное отвлечение части АНПА на решение других задач миссии (обследование найденных объектов, обеспечение связи с береговым центром управления и др.).

Кроме того, во время длительного нахождения в море группировка АНПА может выполнять последовательно несколько миссий, что также требует определения оптимального количества АНПА, привлекаемых к текущей миссии.

Одной из типовых траекторий для группового движения АНПА является движение по общей спирали (спирали Архимеда), которое обеспечивает высокую производительность поисковых операций [1].

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Вопросам управления групповым движением АНПА в последние годы посвящено много научных и научно-производственных публикаций [2, 4, 6, 7]. В указанных и других работах обсуждаются частные вопросы организации управляемого группового движения АНПА, его программного, аппаратного и навигационного обеспечения. Однако, вопросы определения количества АНПА в группе, необходимого для успешного выполнения поисковой подводной миссии, в научной литературе не освещены. Отдельные публикации на эту тему носят описательный характер [3, 5].

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — разработать методику оценки необходимого количества АНПА в группе и оценки их производительности при групповом движении по общей спирали Архимеда как теоретической основы для создания верхнего уровня системы автоматического управления поисковой морской операцией.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

В настоящей статье рассмотрим один их общих вопросов подготовки к морской операции — оценку необходимого количества поисковых АНПА в группе и назначение стартовых точек на поисковой траектории (спирали Архимеда), которые должны занять АНПА группы перед началом подводного поиска, рис. 1.

Выполним оценку потребного количества АНПА в поисковой операции для трех основных вариантов организации поиска:

выполнения поисковых работ в заданный интервал времени без ограничения количества привлекаемых однотипных АНПА в группе (задача 1);

выполнения поисковых работ при заданном ограниченном количестве привлекаемых однотипных АНПА в группе (задача 2);

выполнения поисковых работ при ограниченном количестве привлекаемых разнотипных по скорости движения АНПА в группе (задача 3).

При этом полагаем, что поиск выполняется на круговой рабочей зоне, движение каждого АНПА выполняется по общей спирали Архимеда как наиболее продуктивном способе выполнения поисковых работ [4].

Также полагаем, что дистанция между соседними АНПА в группе не превышает дальности действия бортовых систем связи аппаратов.

Рассмотрим последовательно указанные варианты задачи.

**Полагаем, что для задачи 1 заданы:**

- площадь  $S_{UM}$  круговой рабочей зоны донной поверхности для подводного поиска;
- ширина  $s$  рабочей зоны поисковой аппаратуры  $i$ -го АНПА (однотипные);
- скорость  $v_i$   $i$ -го АНПА (однотипные);
- время  $T_{UMP}$  за которое надо выполнить обследование круговой рабочей зоны  $S_{UM}$

Необходимо найти потребное количество  $N$  однотипных АНПА для обследования площади  $S_{UM}$  с групповым движением подводных аппаратов по общей спирали Архимеда в течение заданного операционного времени поиска  $T_{UMP}$

Решение находим путем выполнения следующей последовательности расчетов:

– находим площадь построенной спирали Архимеда  $S_A$ , которая должна быть равной площади  $S_{UM}$  рабочей зоны (круговой зоны поиска на донной поверхности):

$$S_A = S_{UM} = \frac{1}{2} \int_0^{\varphi_M} r^2 d\varphi, \tag{1}$$

где  $r$ ,  $\varphi$  — соответственно, текущие значения радиус-вектора и полярного угла;  $\varphi_M$  — полярный угол спирали Архимеда площадью  $S_{UM}$ ;

– находим число витков спирали Архимеда  $w_{UM}$  при заданной площади  $S_A \geq S_{UM}$ :

$$w_{UM} = \frac{R_{UM}}{s} = \sqrt{\frac{S_{UM}}{\pi s^2}}; \tag{2}$$

полагая, что  $s \ll R_{UM}$  и, следовательно, внешние витки спирали по форме близки к окружностям;

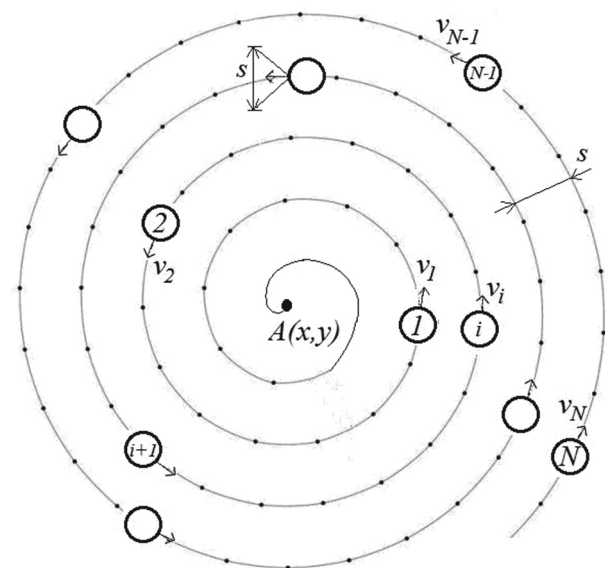


Рис. 1. Движение группы АНПА по общей спирали

– находим полярный угол вычисленной спирали Архимеда:

$$\varphi = 2\pi w_{UM}; \quad (3)$$

– находим длину спирали Архимеда  $L_{UM}$  с шагом  $s$ , которая покрыла бы площадь круговой рабочей зоны  $S_A$ :

$$L_{UM} = 0,5s \left[ \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln \left( \varphi + \sqrt{1 + \varphi^2} \right) \right]; \quad (4)$$

– находим время  $T_i$ , которое необходимо  $i$ -му аппарату группы для преодоления дистанции  $L_{UM}$ :

$$T_i = L_{UM} / v_i; \quad (5)$$

– находим искомое количество АНПА  $N$  для обследования заданной площади донной поверхности  $S_{UM}$ :

$$N = T_i / T_{UM} \quad (6)$$

Округление полученного числа  $N$  проводим в большую сторону.

*Пример для задачи 1:*

*Дано:*

$$S_{UM} = 3,14 \times 10^4 \text{ м}^2;$$

$$s = 5 \text{ м}; v_i = 1 \text{ м/с};$$

$$T_{UM} = 15 \text{ минут.}$$

*Необходимо определить:* количество подводных аппаратов  $N$ , необходимых для обследования рабочей зоны  $S_{UM}$ .

Расчет выполним в такой последовательности:

– находим число витков спирали Архимеда  $w_{UM}$  при обследовании заданной площади  $S_{UM}$ :

$$w_{UM} = \sqrt{\frac{S_{UM}}{\pi s^2}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 10000}{3,14 \cdot 5^2}} = 20 \text{ витков};$$

– находим полярный угол вычисленной спирали Архимеда:

$$\varphi = 2\pi w_{UM} = 2\pi 20 = 40\pi \text{ с}^{-1};$$

– находим длину спирали Архимеда  $L_{UM}$  с шагом  $s$ , которая покрыла бы площадь круговой рабочей зоны  $S_{UM}$ :

$$\begin{aligned} L_{UM} &= 0,5s \left[ \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln \left( \varphi + \sqrt{1 + \varphi^2} \right) \right] = \\ &= 0,5 \cdot 5 \left[ 40\pi \sqrt{1 + (40\pi)^2} + \ln \left( 40\pi + \sqrt{1 + (40\pi)^2} \right) \right] = \\ &= 15780,29 \text{ м}; \end{aligned}$$

– находим время  $T_i$ , которое необходимо  $i$ -му аппарату группы для преодоления дистанции  $L_{UM}$ :

$$T_i = L_{UM} / v_i = 15780,29 \text{ м} / 1 \text{ м/с} =$$

$$= 15780,29 \text{ с} = 263 \text{ мин.} \approx 4,4 \text{ часа};$$

– находим искомое количество АНПА  $N$  для обследования заданной площади донной поверхности  $S_{UM}$ :

$$N = T_i / T_{UM} = 15780,29 / (15 \cdot 60) = 17,53 \text{ аппаратов.}$$

После округления в большую сторону получим:

$$N = 18 \text{ АНПА.}$$

**Полагаем, что для задачи 2 заданы:**

– площадь  $S_{UM}$  круговой рабочей зоны донной поверхности для подводного поиска;

– ширина  $s$  рабочей зоны поисковой аппаратуры  $i$ -го АНПА (однотипные);

– скорость  $v_i$   $i$ -го АНПА (однотипного);

– выделенное количество  $N$  однотипных АНПА для обследования площади  $S_{UM}$  при групповом их движении по спирали Архимеда.

Необходимо найти время  $T_{UM}$  за которое можно выполнить обследование круговой рабочей зоны  $S_{UM}$  выделенным количеством АНПА  $N$ .

Решение находим путем выполнения следующей последовательности расчетов:

– находим время  $T_i$ , которое необходимо  $i$ -му аппарату группы для преодоления дистанции, равной длине спирали  $L_{UM}$  по формулам (1)–(5).

– находим искомое время  $T_{UM}$  необходимое для обследования заданной площади донной поверхности  $S_{UM}$ :

$$T_{UM} = T_i / N. \quad (7)$$

*Пример для задачи 2:*

*Дано:*

$$S_{UM} = 3,14 \times 10^4;$$

$$s = 5 \text{ м};$$

$$v_i = 1 \text{ м/с};$$

$$N = 10.$$

*Необходимо определить:* время  $T_{UM}$  за которое с помощью выделенного количества АНПА ( $N = 10$ ) можно выполнить обследование заданной круговой рабочей зоны  $S_{UM}$ .

Расчет выполним в такой последовательности:

– находим время  $T_i$ , которое необходимо  $i$ -му аппарату группы для преодоления дистанции, равной длине спирали  $L_{UM} = 15780,29 \text{ м}$  (вычисление по аналогии с примером для задачи 1):

$$T_i = L_{UM} / v_i = 15780,29 \text{ м} / 1 \text{ м/с} = 15780,29 \text{ с};$$

– искомое время  $T_{UM}$  необходимое для обследования заданной площади донной поверхности  $S_{UM}$  находим из отношения:

$$T_{UM} = T_i / N = 15780,29 / 10 = 1578 \text{ с} = 26,3 \text{ мин.}$$

**Полагаем, что для задачи 3 заданы:**

– площадь  $S_{UM}$  круговой рабочей зоны донной поверхности для подводного поиска;



– ширина  $s$  рабочей зоны поисковой аппаратуры  $i$ -го АНПА (однотипный параметр);

– выделенное количество разнотипных по скорости движения АНПА  $N$  для обследования площади  $S_{UM}$  при групповом их движении по спирали Архимеда; при этом, в общем случае, каждый АНПА группы имеет свое, отличное от других, значение скорости подводного хода  $v_i$ .

Необходимо найти время  $T_{UM}$  за которое можно выполнить обследование круговой рабочей зоны  $S_{UM}$  выделенным количеством  $N$  разнотипных АНПА.

Решение находим путем выполнения следующей последовательности расчетов:

– используя выражение (4) находим длину спирали Архимеда  $L_{UM}$  с шагом  $s$ , которая покрыла бы площадь круговой рабочей зоны  $S_A$ ;

– находим искомое время  $T_{UM}$ , необходимое для обследования заданной площади донной поверхности  $S_{UM}$ , из очевидного отношения:

$$T_{UM} = \frac{L_{UM}}{\sum_{i=1}^N v_i}. \quad (8)$$

*Пример для задачи 3:*

*Дано:*

$$S_{UM} = 3,14 \times 10^4;$$

$$s = 5 \text{ м};$$

$$N = 10 (V_{1-5} = 1 \text{ м/с}; V_{6-10} = 5 \text{ м/с}).$$

*Необходимо определить:* затраты времени  $T_{UM}$  на обследование круговой рабочей зоны заданной пло-

щади  $S_{UM}$  выделенным количеством  $N$  разнотипных АНПА.

Расчет выполним в такой последовательности:

– находим длину спирали Архимеда  $L_{UM}$  с шагом  $s$ , которая покрыла бы площадь круговой рабочей зоны  $S_{UM}$  (вычисление по аналогии с примером для задачи 1):

$$L_{UM} = 15780,29 \text{ м};$$

– при заданном количестве АНПА с известными скоростными характеристиками в соответствии с отношением (8) вычисляем искомое время:

$$T_{UM} = \frac{L_{UM}}{\sum_{i=1}^N v_i} = \frac{15780,29}{5 \cdot 1 + 5 \cdot 5} = 526,1 \text{ с} = 8,77 \text{ мин.}$$

Таким образом, зависимости (1) – (8) образуют методику оценки необходимого количества АНПА для поисковых морских операций и оценки их производительности с учетом индивидуальных скоростных характеристик. Указанные зависимости могут служить теоретической основой при создании верхнего уровня системы автоматического управления поисковой морской операцией.

**ВЫВОДЫ.** Получены аналитические зависимости и апробирована методика оценки необходимого количества АНПА в группе для выполнения поисковой морской операции при наличии и отсутствии ограничений технического и временного характера.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Блинцов, В. С. Современные задачи группового управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов [Текст] / В. С. Блинцов, Л. Т. Алоба, Ф. Т. Доан // Збірник наукових праць НУК. — 2016. — № 3. — С. 91 – 99.
- [2] Вельтищев, В. В. Особенности разработки навигационного обеспечения группировки автономных необитаемых аппаратов [Текст] / В. В. Вельтищев, С. А. Егоров, А. Н. Кропотов и др. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2014. — Том 7. — № 2. — С. 41 – 45.
- [3] Методы и подходы к решению задач группового управления автономными подводными аппаратами [Текст] / Л. В. Киселев, И. В. Бычков, Н. Н. Максимкин, Н. В. Нагул, М. Ю. Кензин, Р. И. Козлов, С. А. Ульянов // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика: материалы Междунар. конф., посвященной 90-летию со дня рождения акад. Н. Н. Яненко (Новосибирск, Россия, 30 мая — 4 июня 2011 г.). — Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2011. — С. 37 – 38.
- [4] Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов [Текст] / Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев, И. В. Бычков, Н. Н. Максимкин, А. Е. Хмельнов, М. Ю. Кензин // Подводные исследования и робототехника. — 2009. — С. 34 – 43.
- [5] Туфанов, И. Е. Методы решения обзорно-поисковых задач с применением групп автономных необитаемых подводных аппаратов [Текст]. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Институт проблем морских технологий ДВО РАН. — Владивосток, 2014.
- [6] Туфанов, И. Е. Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды [Текст] / И. Е. Туфанов, А. Ф. Щербатюк // Управление большими системами. — 2012. — № 36. — С. 262 – 284.
- [7] Michael Wooldridge. An Introduction to Multi Agent Systems [Text]. — JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002. — 348 p.
- [8] Multi-Robot Systems, Trends and Development, Edited by Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura [Text]. — Published by InTech, 2011. — 586 p.
- [9] Zongrui, Huang A multi-AUV cooperative hunting method in 3-D underwater environment with obstacle [Text] / Zongrui Huang, Daqi Zhun, Bing Sun // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2016. — Pp. 192 – 200.

© Алоба Лео Тосін

Надійшла до редколегії 03.08.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК д-р техн. наук, проф. В. С. Блинцов