

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ФЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# ХАБАРЛАРЫ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
СЕРИЯСЫ

◆  
СЕРИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ  
◆  
PHYSICO-MATHEMATICAL  
SERIES

2 (306)

НАУРЫЗ – СӘУІР 2016 ж.  
МАРТ – АПРЕЛЬ 2016 г.  
MARCH – APRIL 2016

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА  
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ  
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД  
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА  
АЛМАТЫ, НАН РК  
ALMATY, NAS RK

Бас редактор  
ҚР ҰҒА академигі,  
**Мұтанов Г. М.**

Редакция алқасы:

физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ф.докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчеков Ж.Ж.**; физ.-мат. ф.докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ф. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әмірбаев Ү.Ү.**

Редакция кеңесі:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзіrbайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзіrbайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ф. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Г л а в н ы й р е д а к т о р

академик НАН РК

**Г. М. Мутанов**

Р е д а к ц и о н на я кол л е г и я:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

**«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X**

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,  
[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

**G. M. Mutanov,**  
academician of NAS RK

Editorial board:

**A.A. Ashimov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kovalev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**I.N. Vishnievski**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

**News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.**

**ISSN 1991-346X**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,  
[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2016

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 306 (2016), 29–34

УДК 001.891.5:536.46:662.6

**NUMERICAL MODELING OF FORMATION AND DESTRUCTION  
OF NO<sub>x</sub> BY TWO KINETIC MECHANISMS DURING COMBUSTION  
OF FOSSIL FUEL IN THE FURNACE OF CHP**

**A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, S.A. Bolegenova, Maximov V.Yu., Beketayeva M.T.**

Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan  
E-mail: [Beketayeva.m@gmail.com](mailto:Beketayeva.m@gmail.com)

**Key words:** NO<sub>x</sub> concentration, environmental impact, numerical modelling, kinetic mechanism, combustion chamber

**Abstract.** Thermal power plants, causing the emission of harmful substances such as sulfur and nitrogen oxides in the operation are a major source of adverse impact on the environment. In this paper, using modern methods of 3D computer modeling using two global schemes of formation and destruction of harmful nitrogen compounds NO<sub>x</sub> mass transfer processes have been studied in a real industrial furnace boiler BKZ-75. On the basis of these results and their verification it was offered the most appropriate mechanism for NO<sub>x</sub> formation during numerical calculation of Kazakh coal combustion.

УДК 001.891.5:536.46:662.6

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ  
NO<sub>x</sub> ПО ДВУМ КИНЕТИЧЕСКИМ МЕХАНИЗМАМ ПРИ ГОРЕНИИ  
УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ТЭЦ**

**А.С. Аскарова, С.А. Болегенова, С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов, М.Т. Бекетаева**

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

**Ключевые слова:** концентрация NO<sub>x</sub>, влияние на окружающую среду, численное моделирование, кинетический механизм, топочная камера.

**Аннотация.** Тепловые электрические станции, обуславливая выбросы вредных веществ как окислы серы и азота при эксплуатации, являются одним из основных источников вредного воздействия на

окружающую среду. В настоящей работе с помощью современных методов 3D компьютерного моделирования с применением двух глобальных схем формирования и деструкции вредных азотосодержащих веществ  $\text{NO}_x$  были исследованы процессы массопереноса в реальной топочной камере промышленного котла БКЗ-75. На основе полученных результатов и их верификаций был предложен наиболее приемлемый механизм образования  $\text{NO}_x$  для проведения численных расчетов при сжигании казахстанского угля.

По результатам мирового энергетического обзора предполагается, что глобальные потребности в энергии будут только расти в течение ближайших десятилетий, при этом твердые ископаемые виды топлива будут продолжать доминировать в качестве сырья для энергетической промышленности. Использование в теплоэнергетической отрасли низкосортных топлив приводит к отрицательным последствиям, в связи с чем остаются актуальными вопросы интенсивного развития и разработки различных методов и технологий для повышения эффективности сжигания топлива [1-5].

Обеспечение экологической безопасности окружающей среды, в основе которого лежит попытка минимизировать антропогенное воздействие ТЭС на атмосферу, требует всестороннего изучения технологических процессов при эксплуатации энергетических установок. В настоящее время глубокое изучение таких сложных нелинейных процессов как горение топлива, имеющих место в топочных камерах ТЭС почти невозможно без применения вычислительных методов, так как проведение натурных экспериментов непосредственно на ТЭЦ нуждается в финансовых и временных затратах.

Применение компьютерных технологий эффективно, когда одновременно прорабатываются несколько конструкторских решений и определяется стратегия модернизации котла или топочной камеры. Точность и адекватность ожидаемых результатов обеспечиваются правильной постановкой физико-математической и химической моделей сгорания топлива [6-9]. Для постановки правильной химической модели задачи о горении топлива и формировании окислов азота в данной работе были рассмотрены два кинетических механизма, которые наиболее широко применяются в ряде стран: модель De Soete [10] и модель Mitchell-Tarbell [11].

Выбор адекватно описывающей модели процесса производства и подавления азотосодержащих компонентов может быть полезной при проведении численных исследований с целью получения наиболее реальных данных, которые могут использоваться при оценке характера процессов горения в новых конструкторских разработках и при оптимизации сжигания пылеугольного топлива.

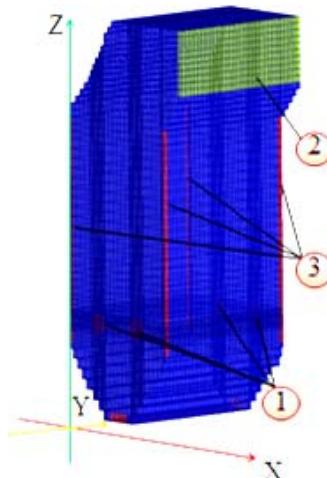


Рисунок 1 – Общий вид котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ и его дискретизация на контрольные объемы:  
1-горелки, 2-область выходного сечения камеры, 3-присосы  
X-ширина топки, Y-глубина топки, Z-высота топочной камеры

В предложенной работе для исследования формирования и деструкции азотистых соединений  $\text{NO}_x$  использовалась топочная камера котла БКЗ-75 (Шахтинская ТЭЦ), в котором в качестве угольного топлива сжигается карагандинский уголь, имеющий состав: С – 33.87%, Н<sub>2</sub> – 6.63%, S –

1.92%, N<sub>2</sub> – 2.23%, O<sub>2</sub> – 9.65%, W – 10.60%, A – 35.1%, Q – 34162 кДж/кг, R<sub>90</sub> – 20%. На рисунке 1 представлена дискретизация топочной камеры котла БКЗ-75 для проведения вычислительных экспериментов. Топочная камера имеет конечно-разностную сетку, которая состоит из 126 496 контрольных объемов.

Численное исследование процессов массопереноса концентрации NO<sub>x</sub> основано на решении трехмерных уравнений конвективного тепломассопереноса с учетом конвективного и радиационного теплообмена, химической кинетики и двухфазности среды. Эти нелинейные уравнения состоят из закона сохранения массы и импульса (уравнение Навье-Стокса), закона сохранения энергии и вещества [12-15].

Для формирования окислов азота NO<sub>x</sub> в качестве ключевой реакции кинетическая схема по модели De Soete использует механизм, где 90% оксидов азота NO формируются через синильную кислоту HCN, также модель учитывает влияние атомарного азота N.

Первая схема формирования оксидов азота NO по модели De Soete базируется на синильную кислоту HCN:

$$\begin{aligned} \frac{dY_{NO}}{dt} &= 1 \cdot 10^{10} Y_{HCN} Y_{O_2}^b \exp(-33700/T) \\ \frac{dY_{N_2}}{dt} &= 3 \cdot 10^{12} Y_{HCN} Y_{NO}^b \exp(-30100/T) \end{aligned} \quad (1)$$

Вторая схема формирования оксидов азота NO учитывает аммиак NH<sub>3</sub>:

$$\begin{aligned} \frac{dY_{NO}}{dt} &= 4 \cdot 10^6 Y_{NH_3} Y_{O_2}^b \exp(-16100/T) \\ \frac{dY_{N_2}}{dt} &= 1.8 \cdot 10^8 Y_{NH_3} Y_{NO}^b \exp(-13600/T) \end{aligned} \quad (2)$$

В модели Mitchell-Tarbell образование оксидов азота NO происходит при окислении азота связанных с топливом. Кинетическая схема учитывает реакции первичного пиролиза, гомогенного горения углеводородистых соединений, гетерогенного горения кокса и образование термических и топливных азотистых соединений. Конечными азотными центрами в модели считаются подсистемы CN (HCN, CN и др.).

Модель Mitchell-Tarbell предлагает первую стадию реакции в преобразовании синильной кислоты HCN в аммиак NH<sub>3</sub>:

$$\frac{dY_{HCN}}{dt} = -1.94 \cdot 10^{15} Y_{HCN} Y_{O_2} \exp(-39500/T) \quad (3)$$

А образовавшийся аммиак NH<sub>3</sub> формирует и разрушает оксид азота NO в двух параллельных реакциях:

$$\begin{aligned} \frac{dY_{NO}}{dt} &= \frac{3.48 \cdot 10^{20} Y_{NH_3} Y_{O_2} \exp(-50325/T)}{1 + 6.90 \cdot 10^{-6} \exp(21140/T)} \\ \frac{dY_{NH_3}}{dt} &= -6.22 \cdot 10^{14} Y_{NH_3} Y_{NO} \exp(-27680/T) \end{aligned} \quad (4)$$

Также в модели Mitchell-Tarbell учитывается рециркуляция оксидов азота NO назад в синильную кислоту HCN при взаимодействии с углеводородами:

$$\frac{dY_{NO}}{dt} = -1.0 \cdot 10^4 Y_{NO} Y_{CxHy} \quad (5)$$

Ниже представлены результаты вычислительных экспериментов по формированию и деструкции оксидов азота NO<sub>x</sub> по двум моделям формирования NO<sub>x</sub> модель Mitchell-Tarbell (MT) и модель De Soete (DS).

На рисунках 2-3 представлены трехмерные поля концентраций оксидов азота NO<sub>x</sub>, из анализа которых можно сказать, что распределения концентраций NO<sub>x</sub> для двух указанных моделей отличаются. Это обусловлено тем, что в модели De Soete расчет формирования NO<sub>x</sub> производится в основном по идеализированной кинетической схеме химических реакций при горении высококачественных углей, в то время как в модели Mitchell-Tarbell кинетическая схема основывается на химических реакциях в нескольких этапах включающие в себя первичный

пиролиз, горение летучих компонентов и углеводородов СН, и горение коксового остатка, которые учитываются при горении низкокачественных углей.

На рисунке 3 показаны трехмерные распределения концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$  на выходе из топочной камеры по двум моделям формирования и деструкции  $\text{NO}_x$ . Понижение здесь концентрации оксидов азота обусловлено слабыми химическими взаимодействиями. Разность в средних значениях концентраций оксидов азота  $\text{NO}_x$  по указанным моделям составляет ~25%.

На рисунке 4 представлена верификация средних значений концентраций оксидов азота  $\text{NO}_x$  по моделям Mitchell-Tarbell и De Soete со значениями концентраций оксидов азота  $\text{NO}_x$ , полученными непосредственно на ТЭЦ [16], а также со значением ПДК [17] для углесжигающих ТЭС. Анализируя данные, можно заметить, что экспериментальные точки и значение ПДК (640 мг/нм<sup>3</sup>) ближе к значениям, которые были получены при использовании модели Mitchell-Tarbell, в то время как для второго случая (модель De Soete) значения явно занижены.

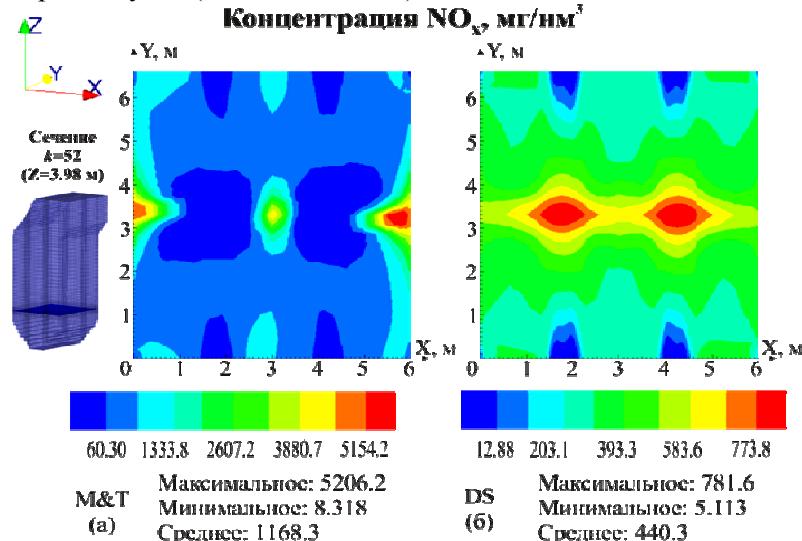


Рисунок 2 – Распределение концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$  в области расположения горелочных устройств топочной камеры котла БКЗ-75

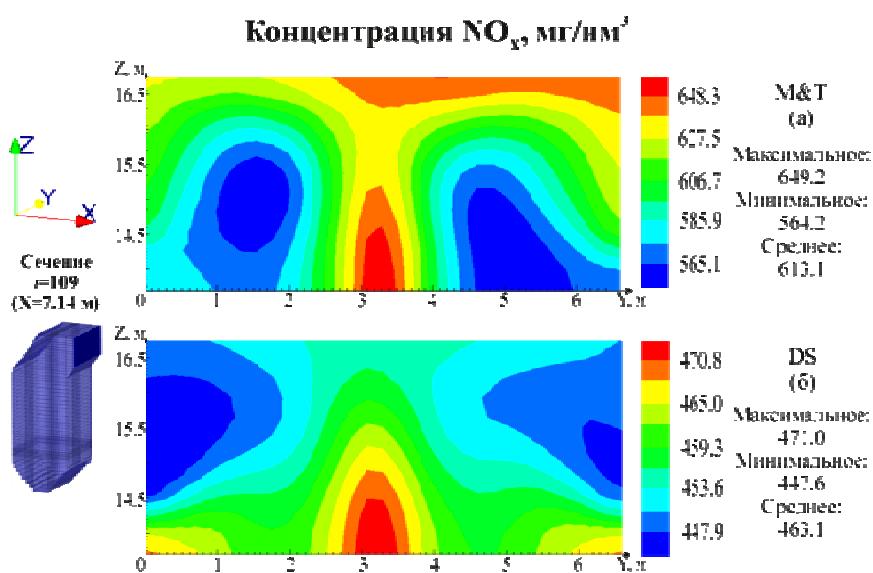


Рисунок 3 – Распределение концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$  на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75

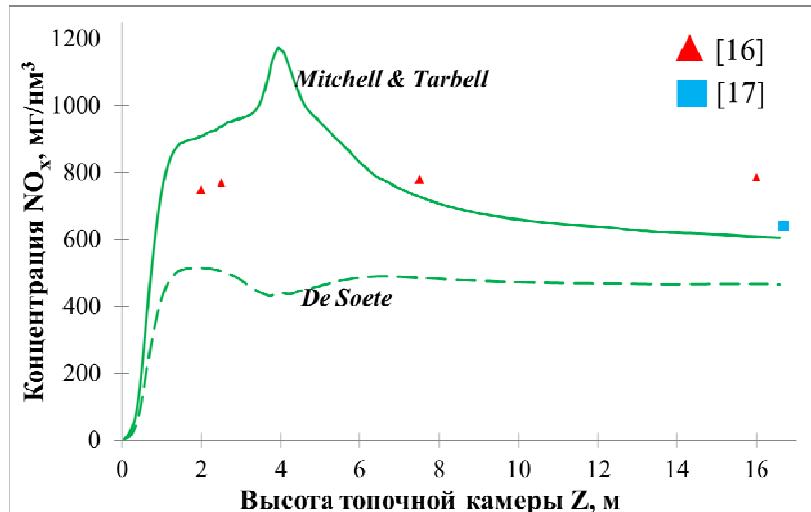


Рисунок 4 – Распределения средних значений концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$  по высоте топки котла БКЗ-75 для двух моделей и ее верификация

Таким образом, при проведении вычислительных экспериментов по сжиганию казахстанских углей высокой зольности (30-50%) можно говорить об адекватности результатов при использовании модели Mitchell-Tarbell. Однако можно отметить, что для получения в кратчайший срок данных о процессах массообмена азотистых веществ пригодна модель De Soete, ее применение может значительно ускорить численный расчет, уменьшить вычислительные и временные ресурсы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B. etc. Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion in a Power Boiler Furnace // High Temperature. 2015. V. 53. № 3. P. 445.
- [2] Messerle V.E., Ustimenko A.B., Maximov Yu.V. etc. Numerical Simulation of the Coal Combustion Process Initiated by a Plasma Source // Journal of Thermophysics and Aeromechanics. 2014. V. 21. Iss. 6. P. 747.
- [3] Belosevic S., Tomanovic I., Beljanski V. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants // Applied thermal engineering. 2015. T. 74. P. 102.
- [4] Safarik P., Maximov V., Beketayeva M.T. et al. Numerical Modeling of Pulverized Coal Combustion at Thermal Power Plant Boilers // Journal of Thermal Science. 2015. V. 24. Iss. 3. P. 275.
- [5] Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С. Новый альтернативный (частично-гомогенный) процесс сгорания как способ снижения концентраций оксидов азота и сажи в продуктах сгорания дизеля // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 2. С. 294.
- [6] Askarova A.S., Karpenko E.I., Messerle V.E. et al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels // Journal of High Energy Chemistry. 2006. V. 40. Iss. 2. P.111.
- [7] Lavrishcheva Ye.I., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. etc. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Science, 2007. V. 35. Iss. 6. P.1607.
- [8] Ustimenko A.B., Askarova A.S., Messerle V.E., Nagibin A. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system // Journal of Thermophysics and Aeromechanics, 2010. V. 7. Iss. 3. P. 435.
- [9] Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Gabitova Z. etc. Computational Method for Investigation of Solid Fuel Combustion in Combustion Chambers of a Heat Power Plant // High Temperature. 2015. V. 53. № 5. P. 751.
- [10] De Soete G.G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen // 15th international symposium on combustion. – Pittsburgh, 1975. P. 1093.
- [11] Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // AIChE Jurnal. 1982. V. 28. P. 302.
- [12] Müller H. Numerische simulation von Feuerungen. CFD-Vorlesung. TU. – Braunschweig: IWBT, 1997. 812 s.
- [13] Pauker W. Creating data sets for Florean using the tool PREPROZ. TU. – Braunschweig: IWBT, 1997. 324 s.
- [14] Roache P.J. Computational fluid dynamics. – Albuquerque: Hermosa Press, 1985. 283 p.
- [15] Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. – Braunschweig, 2006. 52 p.
- [16] Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и перспективы. – Алматы, 2011. 306 с.
- [17] РНД 34.02.303-91 Отраслевая инструкция по нормированию вредных выбросов в атмосферу для тепловых электростанций и котельных. – Астана, 2005. 36 с.

REFERENCES

- [1] Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B. etc. Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion in a Power Boiler Furnace. *High Temperature*, **2015**, 53(3), 445-452 (in Eng.).
- [2] Messerle V.E., Ustimenko A.B., Maximov Yu.V. etc. Numerical Simulation of the Coal Combustion Process Initiated by a Plasma Source. *Journal of Thermophysics and Aeromechanics*, **2014**, 21(6), 747-754 (in Eng.).
- [3] Belosevic S., Tomanovic I., Beljanski V. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants. *Applied thermal engineering*, **2015**, 74, 102-110 (in Eng.).
- [4] Safarik P., Maximov V., Beketayeva M.T. et al. Numerical Modeling of Pulverized Coal Combustion at Thermal Power Plant Boilers. *Journal of Thermal Science*, **2015**, 24(3), 275-282 (in Eng.).
- [5] Кавтагадзе Р.З., Сергеев С.С. Новый альтернативный (частично-гомогенный) процесс сгорания как способ снижения концентраций оксидов азота и сажи в продуктах сгорания дизеля. *Теплофизика высоких температур*, **2014**, 52(2), 282-296 (in Russ.).
- [6] Askarova A.S., Karpenko E.I., Messerle V.E. et al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels. *Journal of High Energy Chemistry*, **2006**, 40(2), 111-118 (in Eng.).
- [7] Lavrishcheva Ye.I., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. etc. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **2007**, 35(6), 1607-1616 (in Eng.).
- [8] Ustimenko A.B., Askarova A.S., Messerle V.E., Nagibin A. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system. *Journal of Thermophysics and Aeromechanics*, **2010**, 7(3), 435-444 (in Eng.).
- [9] Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Gabitova Z. etc. Computational Method for Investigation of Solid Fuel Combustion in Combustion Chambers of a Heat Power Plant. *High Temperature*, **2015**, 53(5), 751-757 (in Eng.).
- [10] De Soete G.G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen. 15th international symposium on combustion. Pittsburgh, **1975**, 1093-1102 (in Eng.).
- [11] Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion. *AIChE Journal*, **1982**, (28), 302-320 (in Eng.).
- [12] Müller H. Numerische simulation von Feuerungen. CFD-Vorlesung. TU. Braunschweig: IWBT, **1997**. 812 s. (in Ger.).
- [13] Pauker W. Creating data sets for Flocean using the tool PREPROZ. TU. Braunschweig: IWBT, **1997**. 324 s. (in Ger.).
- [14] Roache P.J. Computational fluid dynamics. Albuquerque: Hermosa Press, **1985**. 283 p. (in Eng.)
- [15] Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. Braunschweig, **2006**. 52 p. (in Eng.)
- [16] Aliarov B.K., Aliarova M.B. Szhiganie kazahstanskikh uglei na TEC i na krupnih kotelnih: opit i perspektivi. Алматы, **2011**. 306 c. (in Kaz.).
- [17] RND 34.02.303-91 Otraslevaya instruktsiya po normirovaniyu vrednykh vybrosov v atmosferu dlya teplovyykh elektrostantsiy i kotel'nykh. Астана, **2005**. 36 c. (in Kaz.).

**ЖЭС ЖАНУ КАМЕРАСЫНДА КӨМІРДІҢ ЖАНУЫ КЕЗІНДЕ NO<sub>x</sub> ТҮЗІЛУІ МЕН  
ЖОЙЫЛУЫН ЕКІ КИНЕТИКАЛЫҚ МЕХАНИЗМ БОЙЫНША САНДЫҚ МОДЕЛДЕУ**

**Ә.С. Асқарова, С.Ә. Болегенова, С.Ә. Болегенова, В.Ю. Максимов, М.Т. Бекетаева**

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті

**Түйін сөздер:** NO<sub>x</sub> концентрациясы, қоршаган ортаға әсері, сандық моделдеу, кинетикалық механизм, жану камерасы.

**Аннотация.** Жылу электр станциялары қолданыс кезінде құкірт пен азот totықтарының шығырларын бөле отырып қоршаган ортаға зиянды әсер етуші көздердің негізгілерінің бірі болып саналады. Ұсынылған жұмыста заману 3D компьютерлік моделдеудің көмегімен зиянды азот totықтарының NO<sub>x</sub> түзілүі мен жойылуының екі глобалды механизмін пайдалана отырып, реалды өндірістік БКЗ-75 қазандығының жану камерасында орын алғатын массаалмасу процестері зерттелді. Алынған нәтижелер мен олардың верификациялануына сүйене отырып, қазакстандық көмірдің жану бойынша сандық есептеулер жүргізу кезіндегі NO<sub>x</sub> концентрацияларының түзілүінің ең дұрыс механизмі ұсынылды.

Поступила 15.03.2016 г.

## МАЗМУНЫ

## Теориялық және тәжірибелік зерттеулер

Бұртебаев Н., Дүйсебаев А., Керимкулов Ж.К., Алимов Д.К., Юшков А.В., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б., Мухамеджанов Е.С., Джансейтов Д.М., Сакута С.Б. 50 және 60 МэВ энергиялық ${}^3\text{He}$ иондарының ${}^{14}\text{N}$ ядроларынан серпімді шашырауын зерттеу.....	5
Алтынбеков Ш. Әртекті топырақ консолидациясының бірөлшемді квазисызықты есебін напордың бастапқы градиенті әсерінде шешу әдісі туралы және оның шегуін анықтау.....	10
Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Ергалиева А.Б., Габитова З.Х., Боранбаева А.Е. 3-D Модельдеу әдістерімен жану процесіне көмірдің ылғалдылығының зиянын зерттеу.....	21
Асқарова Э.С., Болегенова С.Ә., Болегенова С.Ә., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т. ЖЭС жану камерасында көмірдің жануы кезінде $\text{NO}_x$ түзілуі мен жойытуын екі кинетикалық механизм бойынша сандық моделдеу.....	29
Асқарова Э.С., Болегенова С.Ә., Болегенова С.Ә., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т. Жану камерасының қабырға температурасы үшін берілген шекаралық шартының жану процесінің температуралық сипаттамаларына әсерін зерттеу.....	35
Асқарова Э., Болегенова С., Горюховский М., Оспанова Ш., Нұғыманова А., Утемов С. Әр түрлі сұйық отындарың бұрку, тұттану және жану процесстерін зерттеу .....	40
Сапрыгина М.Б., Байсейтова У.С., Шалданбаев А.Ш., Оразов И.О. Толқын тендеуінің шартаралы есебінің тұрлаулы шешілігі туралы.....	48
Бұртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Демьянова А.С., Данилов А.Н., Джансейтов Д.М., Жолдыбаев Т.К., Алимов Д.К. Оптикалық және фолдинг модельдер АЯСЫНДА 50 және 60 МэВ энергияларда ${}^3\text{He}$ иондарының ${}^{13}\text{C}$ ядроларында серпімді шашырау процесстерін зерттеу.....	55
Жұмабаев Д.С., Бакирова Э.А. Импульс әсері бар фредгольм интегралдық-дифференциалдық тендеулер үшін сызықты штеттік есептің бірмөнді шешілімділігінің коэффициенттік белгілері .....	61
Өтебаев Ү.Б., Есенбаев Қ.Ә., Дархан Н.Д. WEB -формалар құрудың технологиялары.....	72
Жұнусова Л.Х., Жұнусов К.Х. Тор тендеулерінің итерациялық әдіспен шығару.....	79
Қабылбеков К.А., Саудахметов П.А., Омашова Г.Ш., Сершікбаева Г.С., Сүйерқұлова Ж.Н. Еркін механикалық тербелістерді зерттеуге арналған компьютерлік зертханалық жұмыстың үйімдастырудың бланкі үлгісі.....	84
Қабылбеков К.А., Саудахметов П.А., Омашова Г.Ш., Сүттібаева Д.И., Қозыбақова Г.Н. Изобаралық процесті зерттеуге арналған компьютерлік зертханалық жұмыстың үйімдастырудың бланкі үлгісі.....	92
Қабылбеков К.А., Омашова Г.Ш., Саудахметов П.А., Нұруллаев М.А., Артығалин Н.А. Карно циклімен жұмыс атқарытын көзгальтышты зерттеуге арналған компьютерлік зертханалық жұмыстың үйімдастырудың бланкі үлгісі.....	98
Түгелбаева Г.Т., Канибекова А. Е. Білім негіздерін физика сабактарына енгізу әдісін жүйелік талдау.....	104
Қойшиева Т.К., Қожасамкулова Ж.Ж., Базарбаева А.И., Бегімбетова Х.А. Объектіге-бағытталған жүйе болашақ маманың ақпараттық-логикалық құзыреттілігін қалыптастыру факторы ретінде.....	108
Қойшиева Т.К., Байтерекова А.И., Салғареева М.И. Болашақ мұғалімдердің кәсіби дайындауда колданылатын объектілі-бағдарлы жобалаудың теориялық негіздері.....	116
Литвиненко Н. Бағдарламалық R ортасын C# ортасына біріктірілуі.....	123
Мақышов С.Тұрақты м-тындаған сандар.....	128
Минглибаев М.Ж., Прокопен A.Н., Бекетауов Б.А. Массалары айнымалы шектелген үш дене мәселесінің эволюциялық тендеуінің накты шешімдері.....	133
Орынбаев С.А., Молдахметов С.С., Байбутанов Б.К., Ешметов М.Б., Ауесжанов Д.С. Жазықтық-импульстік модуляция негізінде көпденгейлі инвертор сатыларының косылу әдістемелерін зерттеу .....	139
Сапрыгина М.Б., Шалданбаев А.Ш., Оразов И.О., Байсейтова У.С. Толқын тендеуінің шартаралы есебінің вөлтерлі болуының үзілді – кесілді шарты.....	147
Сураган Д. Шаттен p-нормасы үшін бір тенсіздік туралы .....	153
Темирбеков Н.М., Турапов А.К. Газлифт үрдісінің бір өлшемді моделінің сандық шешімі .....	159
Ахметова С.Т., Шалданбаев А.Ш., Шоманбаева М.Т. Аргументі ауытқыған жылу тендеуінің шекаралық коши-нейман есебіне сәйкес оператордың спектрінің құрамы туралы.....	169
Шоманбаева М.Т., Шалданбаев А.Ш., Ахметова С.Т. Аргументі ауытқыған жылу тендеуінің жарталай бекітілген шекаралық есебіне сәйкес оператордың үзіксіз спектрі туралы .....	180
Ұлағатты ұстаз туралы. Шералі Бізәл. ....	191

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Теоретические и экспериментальные исследования**

<i>Буртебаев Н., Дүйсебаев А., Керимкулов Ж.К., Алимов Д.К., Юшков А.В., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б., Мухамеджанов Е.С., Джансейтов Д.М., сакута С.Б.</i> Исследование упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^{14}\text{N}$ при энергиях 50 и 60 МэВ.....	5
<i>Алтынбеков Ш.</i> О методике решения одномерной квазилинейной задачи консолидации неоднородного грунта с учетом начального градиента напора и определение его осадка.....	10
<i>Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Ергалиева А.Б., Габитова З.Х., Боранбаева А.Е.</i> Исследование влияния влажности угля на процесс горения методами 3-д моделирования.....	21
<i>Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т.</i> Численное моделирование образования и разложения $\text{NO}_x$ по двум кинетическим механизмам при горении угольного топлива в топочной камере ТЭЦ.....	29
<i>Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т.</i> Исследование влияния граничного условия для температуры на стенках топочной камеры на температурные характеристики процесса горения.....	35
<i>Аскарова А., Болегенова С., Гороховский М., Оспанова Ш., Нұғыманова А., Утелов С.</i> Исследование процессов распыла, воспламенения и горения различного вида жидкого топлива.....	40
<i>Сапрыгина М.Б., Байсейтова У.С., Шалданбаев А.Ш., Оразов И.О.</i> Толқын тендеуінің шартаралты есебінің тұрлаулы шешілігі туралы.....	48
<i>Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Демьянова А.С., Данилов А.Н., Джансейтов Д.М., Жолдыбаев Т.К., Алимов Д.К.</i> Исследование процессов упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^{13}\text{C}$ при энергиях 50 и 60 МэВ в рамках оптического и фолдинг моделей.....	55
<i>Джумабаев Д.С., Бакирова Э.А.</i> Коэффициентные признаки однозначной разрешимости линейной краевой задачи для интегро-дифференциальных уравнений фредгольма с импульсными воздействиями.....	61
<i>Утебаев У.Б., Есентаев К.У., Дархан Н.Д.</i> Технология создания web-форм.....	72
<i>Жунусова Л.Х., Жунусов К.Х.</i> Итерационные методы решения сеточных уравнений.....	79
<i>Кабылбеков К.А., Сайдахметов П.А., Омарова Г.Ш., Серикбаева Г.С., Сүйеркулова Ж.Н.</i> Модель бланка организации компьютерной лабораторной работы по исследованию свободных механических колебаний.....	84
<i>Кабылбеков К.А., Сайдахметов П.А., Омарова Г.Ш., Суттибаева Д.И., Козыбакова Г.Н.</i> Модель бланка организации компьютерной лабораторной работы по исследованию изобарического процесса.....	92
<i>Кабылбеков К.А., Омарова Г.Ш., Сайдахметов П.А., Нураллаев М.А., Артыгалин Н.А.</i> Модель бланка организации компьютерной лабораторной работы по исследованию двигателя, совершающего цикл Карно.....	98
<i>Түгелбаева Г.Т., Канибекова А.</i> Е. Системное обсуждение способов внедрения в уроки по физике основ знаний по экологии.....	104
<i>Койшиева Т.К., Кожамкулова Ж.Ж., Базарбаева А.И., Бегимбетова Х.А.</i> Объектно-ориентированные системы как фактор формирования информационно-логической компетентности будущих специалистов.....	108
<i>Койшиева Т.К., Байтерекова А.И., Салгараева М.И.</i> Теоретические основы объектно-ориентированного проектирования, применимые для профессиональной подготовки будущих учителей.....	116
<i>Литвиненко Н.</i> Интеграция программной среды R в среду C# .....	123
<i>Макышов С.</i> Неподвижные м-порожденные числа.....	128
<i>Минглибаев М.Ж., Прокопеня А.Н., Бекетауов Б.А.</i> Точные решения эволюционных уравнений в ограниченной задачи трех тел с переменными массами.....	133
<i>Орынбаев С.А., Молдахметов С.С., Байбутанов Б.К., Ешметов М.Б., Ауесжанов Д.С.</i> Исследование методик коммутации ступеней многоуровневого инвертора на основе широтно-импульсной модуляции.....	139
<i>Сапрыгина М.Б., Шалданбаев А.Ш., Оразов И.О., Байсейтова У.С.</i> Критерии вольттерровости нелокальной краевой задачи волнового уравнения .....	147
<i>Сураган Д.</i> Об одном неравенстве $p$ -нормы в классе Шаттена.....	153
<i>Темирбеков Н.М., Тураров А.К.</i> Численное решение одномерной модели газлифтного процесса.....	159
<i>Ахметова С.Т., Шалданбаев А.Ш., Шомабаева М.Т.</i> О структуре спектра краевой задачи коши-неймана для уравнения теплопроводности с отклоняющимся аргументом.....	169
<i>Шоманбаева М.Т., Шалданбаев А.Ш., Ахметова С.Т.</i> О непрерывном спектре оператора полузакрепленной краевой задачи для уравнения теплопроводности с отклоняющимся аргументом.....	180
<i>Юбилей Ашуралиев Аллаберен.</i> .....	191

## CONTENTS

## Theoretical and experimental researches

<i>Burtebayev N., Dusebayev A., Kerimkulov Zh.K., Alimov D.K., Yushkov A.V., Zholdybayev T.K., Sadikov B., Mukhamejanov Y.S., Janseitov D.M., Sakuta S.B.</i> Investigation of the elastic scattering of ${}^3\text{He}$ ions on ${}^{14}\text{N}$ at energies 50 and 60 MeV.....	5
<i>Altynbekov Sh.</i> On the method of solving one-dimensional quasilinear problem of consolidation of non homogeneous soil with the initial gradient of pressure and determination of its sediment.....	10
<i>Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Yergaliyeva A., Gabitova Z., Boranbaeva A.</i> Study of coal moisture on the combustion process by 3d modeling.....	21
<i>Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Beketayeva M.T.</i> Numerical modeling of formation and destruction of $\text{NO}_x$ by TWO kinetic mechanisms during combustion of fossil fuel in the furnace of CHP.....	29
<i>Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Beketayeva M.T.</i> Study of the boundary conditions influence for the temperature on the walls of the combustion chamber in the temperature characteristics of the burning process.....	35
<i>Askarova A., Bolegenova S., Gorokhovski M., Ospanova Sh., Nugymanova A., Utelov S.</i> Investigation of atomization, ignition and combustion processes of different types of liquid fuel.....	40
<i>Saprygina M.B., Bayseytova U.S., Shaldanbayev A.Sh., Orazov I.O.</i> About regular solvability of nonlocal boundary value problem of the wave equation.....	48
<i>Burtebayev N., Kerimkulov Zh.K., Demyanova A.S., Danilov A.N., Janseitov D.M., Zholdybayev T.K., Alimov D.K.</i> Investigation of elastic scattering of ${}^3\text{He}$ ions from ${}^{13}\text{C}$ nuclei at 50 and 60 MeV in optical and folding model.....	55
<i>Dzhumabaev D.S., Bakirova E.A.</i> Coefficient conditions for the unique solvability of linear boundary value problem for fredholm integro-differential equation with impulse effects.....	61
<i>Utebaev U.B., Yessentayev K.U., Darkhan N.D.</i> Technology of creation of web-form.....	72
<i>Zhunussova L., Zhunussov K.</i> Iterative methods for solving difference equations .....	79
<i>Kabylbekov K.A., Saidakhmetov P.A., Omashova G.SH., Serikbaeva G.S., Suyerkulova ZH.N.</i> Model of the form of the organisation of computer laboratory operation of the free mechanical oscillations.....	84
<i>Kabylbekov K.A., Saidakhmetov P.A., Omashova G.SH., Sutibaeva D.I., Kozybakova G.N.</i> Model of the form of the organisation of computer laboratory operation of isobaric process.....	92
<i>Kabylbekov K.A., Omashova G.SH., Saidakhmetov P.A., Nurullaev M.A., Artygalin N.A.</i> Model of the form of the organization of computer laboratory operation on examination of the drive making the carnot cycle.....	98
<i>Tygelbaeva G.T., Kanibekova A. E.</i> System discussion of methods of introduction in lessons on physics bases of knowledge on ecology.....	104
<i>Koysheva T.K., Kozhamkulova Zh.Zh., Bazarbaeva A.I., Begimbetova A.</i> Object-oriented system as the factor of formation of information-logical competence of future professionals.....	108
<i>Koishieva T.K., Baiterekova A.I., Salgaraeva M.I.</i> Theoretical bases of object-oriented design, applicable for vocational training of future teachers.....	116
<i>Litvinenko N.</i> Integration of R software environment in C# software environment.....	123
<i>Makayshov S.</i> Stationary m-digitaddition numbers.....	128
<i>Minglibayev M.Dzh., Prokopenya A.N., Beketauv B.A.</i> Exact solutions of evolution equations in restricted three-body problem with variable mass.....	133
<i>Orynbayev S.A., Moldakhmetov S.S., Baibutanov B.K., Jeshmetov M.B., Aueshanov D.S.</i> Methods of switching angles based on pulse width modulation for multilevel inverter.....	139
<i>Saprygina M.B., Shaldanbayev A.Sh., Orazov I.O., Bayseytova U.S.</i> Criteria Volterra of nonlocal boundary value problem of the wave equation .....	147
<i>Suragan D.</i> On an inequality for schatten $P$ -norms .....	153
<i>Temirbekov N. M., Turarov A. K.</i> Numerical solution of the one dimensional model of gas-lift process .....	159
<i>Achmetova S.T., Shaldanbayev A.Sh., Shomabayeva M. T.</i> About structure of the range of the regional task of cauchy - neumann for the heat conductivity equation with the deviating argument.....	169
<i>Shomanbayeva M. T., Shaldanbayev A.Sh., Achmetova S.T.</i> About the continuous range of the operator of the semi-fixed regional task for the heat conductivity equation with the deviating argument.....	180
Anniversary of Ashuraliev Allaber	191

**Publication Ethics and Publication Malpractice  
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct ([http://publicationethics.org/files/u2/New\\_Code.pdf](http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf)). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

**www:nauka-nanrk.kz**

**http://www.physics-mathematics.kz**

Редактор *M. С. Ахметова*  
Верстка на компьютере *A.M. Кульгинбаевой*

Подписано в печать 24.03.2016.  
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.  
11,3 п.л. Тираж 300. Заказ 2.