

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2023)

Павлодар

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

<https://doi.org/10.48081/ABAC7746>

---

**Бас редакторы – главный редактор**

Кислов А. П.

*к.т.н., доцент*

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*  
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*  
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*  
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*  
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*  
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*  
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/VAAP1757>

**\*А. С. Никифоров<sup>1</sup>, М. С. Кучербаев<sup>2</sup>, М. С. Хамитов<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

\*e-mail: [aleke4599@mail.ru](mailto:aleke4599@mail.ru)

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ ПРОКАЛКИ КОКСА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*В данной работе рассматриваются способы оценки термонапряженного состояния футеровки печи по прокалке нефтяного кокса. В качестве примера приводится анализ прочностных характеристик огнеупорной футеровки на начальном этапе разогрева печи по допустимым температурным напряжениям.*

*Одной из основных технологических операций в прокалке нефтяного кокса является процесс прокалки углеродистого сырья при высокой температуре. Качественные характеристики прокаленного материала оказывают определяющее влияние на качество готового нефтяного кокса. Из всех известных технологических агрегатов для прокалки углеродистого сырья чаще всего используют вращающиеся печи, которые характеризуются наиболее низкой стоимостью, простотой обслуживания, имеют высокую производительность.*

*До настоящего времени процесс разрушения футеровки в тепловых агрегатах отождествляется лишь с химическим разрушением огнеупорного кирпича от взаимодействия с перерабатываемым продуктом.*

*Применение известных методов определения механического состояния огнеупорной футеровки, разработанных для условий эксплуатации в энергетических установках для оценки прочности, надежности и долговечности огнеупоров тепловых агрегатов, не дало положительных результатов. Такие дополнительные факторы воздействия, как наличие высоких температур, создают весьма отличительные условия эксплуатации и требуют специфического подхода в научных исследованиях.*

*Ключевые слова: футеровка печи, температурное напряжение, огнеупоры, термоупругость, коробление.*

## Введение

При проектировании и эксплуатации теплотехнологических агрегатов необходимо решать такие важные вопросы, связанные с надежной тепловой работой оборудования, как определение времени возникновения и величины максимальных температурных напряжений в элементах футеровки, зависимости напряжений от теплофизических и геометрических параметров, влияние нестационарных условий теплообмена на величину напряжений и т.д. Поэтому использование приближенных методов расчета, несмотря на то что они имеют определенную погрешность, позволяют решать вышеперечисленные проблемы для реальных систем с необходимой для технических приложений точностью [1].

## Материалы и методы

Рассмотрим термонапряженное состояние футеровки печи проковки нефтяного кокса, представив ее, исходя из геометрических параметров самой печи, в виде массивной плиты, подвергающейся температурному воздействию внутренней среды агрегата.

Основным исходным положением для определения температурных напряжений, при различных законах распределения температуры по толщине огнеупорной кладки, принимаем условие равновесия внутренних сил в футеровке:

$$P = \int \sigma dx = 0 \quad Q = \int \sigma x dx = 0 \quad (1)$$

где  $P$  – усилия;

$Q$  – моменты;

$\sigma$  – напряжения;

$x$  – пространственная переменная.

Расчетные формулы получим на основе решения плоской задачи термоупругости [2]. В этом случае задача сводится к решению уравнения:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ \sigma(x, t) - \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot T(x, t) \right] = 0, \quad (2)$$

где  $t$  – временной параметр;

$\alpha_T$  – коэффициент линейного расширения;

$E$  – модуль упругости;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

После интегрирования уравнения (2) получим:

$$\sigma(x, t) = \varepsilon E = -\frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot T(x, t) + (C + C_1 \cdot x), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – деформация, обусловленная монолитностью футеровки;

$C$  и  $C_1$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий:

$$\sigma(H, t) = 0,$$

где  $H$  – толщина футеровки.

Если учитывать деформации, вызываемые температурными напряжениями при свободном перемещении отдельных слоев футеровки через эсв, то выражение (3) будет иметь вид:

$$\sigma(x, t) = -\frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot T(x, t) + (C + C_1 \cdot x) = \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon - \varepsilon_{св}), \quad (4)$$

$$\text{Здесь, } \varepsilon_{св} = \alpha_T \cdot T, \quad \varepsilon = \frac{(C + C_1 x)(1-\nu)}{E}.$$

В случае, если  $\varepsilon_{св} > \varepsilon$ , различные слои будут испытывать напряжения сжатия, а если  $\varepsilon_{св} < \varepsilon$ , то растягивающие усилия.

Следовательно, при повышении температуры возникают напряжения сжатия:

$$\sigma_{сж} = \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon - \alpha_T T),$$

а при понижении температуры напряжения растяжения

$$\sigma_{сж} = \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon + \alpha_T T).$$

Для определения постоянных интегрирования  $C$  и  $C_1$ , а также  $\varepsilon$  необходимо воспользоваться уравнениями (1), которые запишутся в следующем виде:

$$\int \sigma dx = \int \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon - \varepsilon_{св}) dx = 0, \quad (5)$$

$$\int \sigma x dx = \int \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon - \varepsilon_{св}) x dx = 0.$$

Примем  $E$  и  $\alpha T$  постоянными. Для быстрой оценки термических напряжений такое допущение вполне оправдано, т.к. в пределах целесообразного применения огнеупорных материалов при высоких

температурах  $E$  уменьшается, а  $\alpha T$  – возрастает. Поэтому точность расчета изменится незначительно [3].

Решая уравнения (5), находим

$$\varepsilon = \frac{\alpha_T}{H} \left[ \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} T(x, t) dx + \frac{12x}{H^2} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} T(x, t) dx \right], \quad (6)$$

$$\sigma(x, t) = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} T(x, t) dx + \\ & \frac{12x}{H^3} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} T(x, t) x dx - T(x, t) \end{aligned} \right] \quad (7)$$

Совместим ось  $x$  с поверхностью футеровки, тогда переменная  $x$  преобразуется в  $()$ .

В этом случае уравнения (6) и (7) примет следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_T}{H} \left[ \int_0^H T(x, t) dx + \frac{12(\frac{H}{2}-x)}{H^2} \int_0^H T(x, t) (\frac{H}{2} - x) dx \right], \quad (8)$$

$$\sigma(x, t) = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{H} \int_0^H T(x, t) dx + \\ & \frac{12(\frac{H}{2}-x)}{H^3} \int_0^H T(x, t) (\frac{H}{2} - x) dx - T(x, t) \end{aligned} \right] \quad (9)$$

Таким образом, для рассматриваемой футеровки при ее нагреве, расчетную формулу для определения температурных напряжений можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma(x, t) &= \varepsilon_{сж} + \varepsilon_p + \varepsilon_{изг} = \\ &= \frac{1}{(1-\nu) \cdot H} \int_0^H \alpha_T E T(x, t) + \\ & \frac{12(\frac{H}{2}-x)}{(1-\nu)H^3} \int_0^H \alpha_T E T(x, t) \left(\frac{H}{2} - x\right) dx - \frac{\alpha_T E}{1-\nu} T(x, t) \end{aligned} \quad (10)$$

Если условия закрепления футеровки исключают изгиб, то  $\sigma_{изг} = 0$ ; если препятствуют смещению краев, то  $\sigma_p = 0$ .

Во всех случаях, когда имеется свобода изгибу (коробление) и, следовательно, могут возникать напряжения от неравномерности распределения температуры в сечении футеровки, напряженность уменьшается. Однако этот случай не может быть расчетным, так как вес футеровки и стыковые соединения в действительности почти полностью задерживают коробление, в результате в огнеупорных материалах возникают большие по величине напряжения, чем при свободном короблении. Эти напряжения следует определять, при любом характере распределении температуры по сечению футеровки, по формуле:

$$\sigma(x, t) = \frac{E}{1-\nu} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{св}) = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \left[ \frac{1}{H} \int_0^H T(x, t) dx - T(x, t) \right], \quad (11)$$

Рассмотрим термонапряженное состояние футеровки печи проковки нефтяного кокса в начальный период ее пуска, когда в процессе теплообмена происходит сушка огнеупорных материалов [4].

Распределение температуры по сечению футеровки подчиняется параболической зависимости (рис.1) [5]:

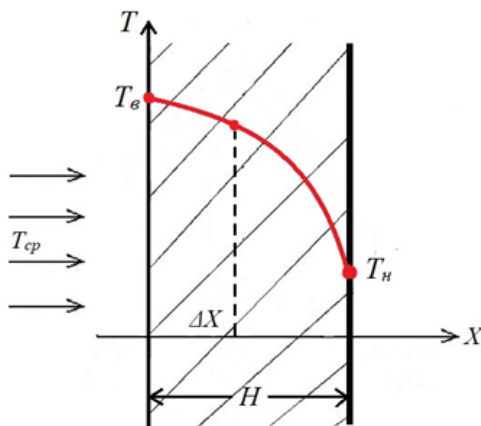


Рисунок 1 – Распределение температуры по сечению футеровки

Известны температуры внутренней  $T_{в} = 250$  °С и наружной  $T_{н} = 20$  °С поверхностей, а также толщина футеровки  $H$ .

Расчетные формулы имеют следующий вид:

$$T(x, t) = T_{в} - \frac{x^2}{H^2} (T_{в} - T_{н}) \quad (12)$$

$$\sigma(x, t) = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \left\{ \left[ T_B - \frac{x^2}{H^2} (T_B - T_H) \right] - \left[ T_B - \frac{1}{3} (T_B - T_H) \right] \right\} \quad (13)$$

Футеровка выполнена из муллитокремнеземистых огнеупоров, имеющих следующие теплофизические характеристики [6]:

$$\alpha_T = 0,86 \cdot 10^{-5} \text{ 1/град}, E = 0,14 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \nu = 0,15, H = 0,4 \text{ м.}$$

Пространственную переменную  $x$  разбиваем на 8 интервалов с  $\Delta x = 0,05 \text{ м}$ .

### Результаты и обсуждение

Результаты расчета по формулам (12) и (13) представлены в таблице 1.

Таблица 1

$\Delta x, \text{ м}$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{ МПа}$
0,05	246,48	10,37
0,10	235,05	8,86
0,15	217,57	6,27
0,20	199,53	2,72
0,25	160,08	-1,88
0,30	120,74	-7,48
0,35	77,07	-13,67
0,40	20,00	-21,78

Анализ табличных данных показывает значительную неравномерность температурного поля по толщине футеровки, которая может привести к возникновению экстремальных как сжимающих, так и растягивающих температурных напряжений.

Выбор режима разогрева футеровки печи будет определяться из условия, что температурные напряжения не должны превышать уровень допустимых напряжений для выбранного типа огнеупоров [7].

Исследуем на экстремум уравнение (13). Для этого дважды продифференцируем данную функцию в пределах  $0 \leq x \leq H$ . Находим стационарную точку из условия, что первая производная  $\sigma'(x, t) = 0$ . Тогда вторая производная  $\sigma''(x, t) < 0$ . Следовательно точка экстремума находится в исследуемых границах. Так как функция  $\sigma(x, t)$  ограничена по пространственной переменной  $x$ , то наибольшее и наименьшее значения  $\sigma(x, t)$  принимает или в точке экстремума или на концах промежутка [8].



В рассматриваемом примере максимальные температурные напряжения приходятся на граничные области: наибольшие сжимающие усилия  $\sigma_{\max}^{\text{сж}} = 10,3$  МПа, а растягивающие напряжения равны  $\sigma_{\max}^{\text{рас}} = 21,1$  МПа.

Здесь необходимо сделать важный вывод о том, что абсолютные численные значения полученных напряжений в футеровке необходимо сопоставлять с прочностными характеристиками огнеупорных материалов, а именно с пределами прочности на сжатие и растяжение используемого огнеупора [9]. В нашем случае предел прочности огнеупора на сжатие лежит в пределах 40 МПа и, как видно, не превышает допустимого предела для данного материала.

С другой стороны, пределы прочности на растяжение большинства применяемых в промышленности огнеупоров, как правило, в несколько раз меньше предела на сжатие [10]. В данном примере полученные растягивающие напряжения уже превышают допустимый предел по прочности.

### **Выводы**

Следовательно, исследуемый режим разогрева футеровки прокалочной печи уже на стадии сушки может приводить к появлению опасных разрушающих напряжений, вызывающих образование трещин, которые ослабляют конструкцию футеровки в целом.

### **Список использованных источников**

1 **Никифоров, А. С.** Надежность работы футеровок металлургических печей. – Павлодар : ЭКО. – 2003. – 110 с.

2 **Боли, Б., Уэйнер, Дж.** Теория температурных напряжений. – М. : Мир, 1964. – 518 с.

3 **Шкляр, Ф. Р., Сургучева, Е. Л., Калугин, Я. П.** Оценка конструкционной термостойкости футеровки // Огнеупоры. – 1988. – № 5. – 9–13 с.

4 **Qin, J., Qi, J.** Analysis on the Refractory Erosion of the Electric Arc Furnace and Study on the Measures of Protecting the Furnace Lining // Advanced Materials Research. – P. 602–604; 2082-2086. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.2082>.

5 **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

6 **Anggono, J.** Mullite Ceramics : Its Properties Structure and Synthesis // Jurnal Teknik Mesin Universitas Kristen Petra. – Vol. 7. – No. 1. – Apr. 2005. – P. 1–10. – <https://doi.org/10.9744/jtm.7.1>.

7 **Schmitt, N., Berthaud, Y., Hernandez, J. F., Meunier, P., Poirier, J.** Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying //

British Ceramic Transactions 103:3. – 2004. – P. 121–133. – <https://doi.org/10.1179/096797804225012873>.

8 **Егоров, А. И.** Оптимальные управления тепловыми и диффузионными процессами. – М., 1978.

9 **Никифоров, А. С., Приходько, Е. В., Кинжибекова, А. К., Карманов, А. Е.** Комплексная оценка остаточного ресурса огнеупорных материалов высокотемпературных агрегатов // Новые огнеупоры. – № 2. – 2022. – 56–61 с.

10 **Стрелов, К. К., Кашеев, И. Д.** Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. – М. : Металлургия, 1996. – 607 с.

### References

1 **Nikiforov, A. S.** Nadezhnost' raboty futerovok metallurgicheskikh pechej [Reliability of operation of linings of metallurgical furnaces]. – Pavlodar : IVF, 2003. – 110 p.

2 **Pain, B., Weiner, J.** Teoriya temperaturnyh napryazhenij [Theory of temperature stresses]. – Moscow : Mir, 1964. – 518 p.

3 **Shklyar, F. R., Surgucheva, E. L., Kalugin, Ya. P.** Ocenka konstrukcionnoj termostojkosti futerovki [Evaluation of the structural thermal stability of the lining] // Refractories. – 1988. – No. 5. – 9–13 p.

4 **Qin, J., Qi, J.** Analysis on the Refractory Erosion of the Electric Arc Furnace and Study on the Measures of Protecting the Furnace Lining // Advanced Materials Research. – P. 602–604. – 2082-2086. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.2082>.

5 **Lykov, A. V.** Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. – Moscow : Higher School, 1967. – 599 p.

6 **Anggono, J.** Mullite Ceramics : Its Properties Structure and Synthesis // Jurnal Teknik Mesin Universitas Kristen Petra. – P. 1–10. – Vol. 7. – No. 1. – Apr. 2005. – <https://doi.org/10.9744/jtm.7.1>.

7 **Schmitt, N., Berthaud, Y., Hernandez, J. F., Meunier, P., Poirier, J.** Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying. – British Ceramic Transactions 103:3. – 2004. – P. 121–133. – <https://doi.org/10.1179/096797804225012873>.

8 **Egorov, A. I.** Optimal'nye upravleniya teplovymi i diffuzionnymi processami [Optimal control of thermal and diffusion processes]. – Moscow, 1978.

9 **Nikiforov, A. S., Prikhodko, E. V., Kinzhibekova, A. K., Karmanov, A. E.** Kompleksnaya ocenka ostatochnogo resursa ogneupornyh materialov vysokotemperaturnyh agregatov [Comprehensive assessment of the residual life of refractory materials of high-temperature aggregates]. – New refractories. – No. 2. – 2022. – 56–61 p.

10 **Strelov, K. K., Kashcheev, I. D.** Teoreticheskie osnovy tekhnologii ognepurnykh materialov [Theoretical foundations of the technology of refractory materials]. – Moscow : Metallurgy, 1996. – 607 p.

Материал поступил в редакцию 20.06.23.

\*А. С. Никифоров<sup>1</sup>, М. С. Кучербаев<sup>2</sup>, М. С. Хамитов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

Материал 20.06.23 баспаға түсті.

## **КОКС ПЕШТЕРІНІҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ӘСЕРЛЕРДІ ЕСЕПТЕУДІҢ КЕЙБІР АСПЕКТИЛЕРІ**

*Бұл мақалада мұнай коксын күйдіру үшін пештің қаптамасының термиялық кернеулі күйін бағалау әдістері талқыланады. Мысал ретінде рұқсат етілген температуралық кернеулер бойынша пешті қыздырудың бастапқы кезеңінде отқа төзімді төсемнің беріктік сипаттамаларының талдауы келтірілген.*

*Мұнай коксын күйдірудегі негізгі технологиялық операциялардың бірі көміртекті шикізатты жоғары температурада күйдіру процесі болып табылады. Күйдірілетін материалдың сапалық сипаттамалары дайын мұнай коксының сапасына шешуші әсер етеді. Көміртекті шикізатты күйдіруге арналған барлық белгілі технологиялық қондырғылардың ішінде ең төменгі құнымен, техникалық қызмет көрсетудің қарапайымдылығымен және жоғары өнімділігімен сипатталатын айналмалы пештер жиі қолданылады.*

*Осы уақытқа дейін жылу қондырғыларындағы қаптаманың бұзылу процесі отқа төзімді кірпіштің өңделген өніммен әрекеттесуден химиялық бұзылуымен ғана анықталады.*

*Жылу қондырғыларының отқа төзімділігінің беріктігін, сенімділігін және ұзақ мерзімділігін бағалау үшін электр станцияларындағы жұмыс жағдайлары үшін әзірленген отқа төзімді қаптаманың механикалық күйін анықтаудың белгілі әдістерін қолдану оң нәтиже бермеді. Жоғары температураның болуы сияқты қосымша факторлар өте әртүрлі жұмыс жағдайларын жасайды және ғылыми зерттеулерде нақты көзқарасты талап етеді.*

*Кілтті сөздер: пештің қаптамасы, температуралық кернеу, отқа төзімділік, термосернімділік, коробление.*

*\*A. S. Nikiforov<sup>1</sup>, M. S. Kucherbayev<sup>2</sup>, M. S. Khamitov<sup>3</sup>*  
<sup>1,2,3</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.  
Material received on 20.06.23.

## **SOME ASPECTS OF THE CALCULATION OF COKE FURNACES FOR TEMPERATURE EFFECTS**

*This paper discusses methods for assessing the thermally stressed state of the furnace lining for the calcination of petroleum coke. As an example, an analysis is given of the strength characteristics of a refractory lining at the initial stage of furnace heating according to allowable temperature stresses.*

*One of the main technological operations in the calcination of petroleum coke is the process of calcining carbonaceous raw materials at high temperature. The quality characteristics of the calcined material have a decisive influence on the quality of the finished petroleum coke. Of all the known technological units for calcining carbonaceous raw materials, rotary kilns are most often used, which are characterized by the lowest cost, ease of maintenance, and high productivity.*

*Until now, the process of destruction of the lining in thermal units is identified only with the chemical destruction of refractory bricks from interaction with the processed product.*

*The use of known methods for determining the mechanical state of the refractory lining, developed for operating conditions in power plants to assess the strength, reliability and durability of refractories of thermal units, did not give positive results. Additional factors such as the presence of high temperatures create very different operating conditions and require a specific approach in scientific research.*

*Keywords: furnace lining, thermal stress, refractories, thermoelasticity, warpage.*

Теруге 20.06.2023 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2023 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

17,5 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,67. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4103

Сдано в набор 20.06 2023 г. Подписано в печать 30.06 2023 г.

Электронное издание

17,5 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,67. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 4103

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)