

Р.Б. Кудабаев¹, А.А. Джумабаев², У.С. Сулейменов¹, М.А. Камбаров¹,
Р.А. Риставлетов¹, Э.Н. Калшабекова¹

¹Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

E-mail: kudabaev_81@mail.ru, atagali@list.ru, ulanbator@inbox.ru, medet_2030@mail.ru, rar_1967@mail.ru, elmura-56@mail.ru

Математическая модель теплообмена при фазовом переходе теплоаккумулирующего материала

Аннотация. Применение парафинов в качестве аккумуляторов тепла в ограждающих конструкциях зданий затруднено в связи с достаточно высокой температурой их фазового перехода, малым коэффициентом теплопроводности, к тому же традиционные системы утепления с использованием теплоизоляционного материала в энергоактивных конструкциях являются малоэффективными. Для повышения энергоэффективности жилых зданий возникает необходимость разработки новых систем и конструкций ограждения с возможностями использования возобновляемых источников энергии для потребностей зданий и возмещения части тепла, затрачиваемого на отопление здания. Для этого необходимо изучить теплообменные процессы в конструкциях здания.

В данной статье приведены результаты изучения процессов фазового перехода теплоаккумулирующего материала в ограждающих конструкциях. Рассмотрены процессы фазового перехода теплоаккумулирующего материала в ограждающих конструкциях с учетом предпосылок и допущений, которые необходимы для упрощения математической модели процесса фазового перехода. Разработана математическая модель теплообмена при фазовом переходе теплоаккумулирующего материала, которая учитывает теплофизические свойства материала, толщину слоя фазового перехода и время ее образования, а также разность температур между температурой исходного состояния и температурой фазового перехода теплоаккумулирующего материала. Установлено, что плотность теплового потока изменяется от большого числа параметров от начального момента времени τ до времени процесса перехода в новую фазу τ_{δ} , и определено, что средняя плотность теплового потока в процессе плавления слоя теплоаккумулирующего материала в два раза больше, чем плотность теплового потока в момент времени, при котором граница раздела фаз переместится на расстояние δ .

Ключевые слова: энергоактивная ограждающая конструкция, теплоаккумулирующие материалы, теплообмен, фазовый переход, теплофизические свойства, тепловой поток, теплоснабжение, системы утепления зданий, возобновляемые источники энергии, толщина слоя фазового перехода.

DOI: doi.org/10.32523/2616-7263-2022-139-2-102-110

Введение

В настоящее время дополнительное утепление зданий осуществляют с использованием различных конструктивно-технологических решений ограждения. Однако эти решения часто принимаются без должного обоснования с позиций строительной теплотехники, что приводит не к экономии энергоресурсов, а, наоборот, их расходованию.

В связи с этим возникает необходимость в разработке новых конструктивных решений ограждающих конструкций, которые не только имеют улучшенные теплозащитные свойства, но и

способных аккумулировать тепловую энергию. Наибольшее распространение для аккумулирования теплоты в технике нашли теплоаккумулирующие материалы на основе парафинов с фазовым переходом «твердое тело - жидкость», позволяющие накапливать относительно большое количество тепла в диапазоне комнатной температуры [1]. Однако теплоаккумулирующие материалы в ограждающих конструкциях применения не нашли. Поэтому сейчас широко разрабатываются новые конструктивные решения ограждающих конструкций со слоями из теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом с целью повышения эффективности ограждения и исследования их теплофизических свойств с учетом аккумулирующей способности слоя ограждения.

Сравнительный анализ теплофизических свойств термоаккумулирующих материалов фазового перехода показал, что наиболее приемлемым для практического использования в аккумуляторах тепла являются парафины [2]. Однако применение их в ограждающих конструкциях зданий связано с трудностями, связанными с достаточно высокой температурой фазового перехода, малым коэффициентом теплопроводности.

Системы теплоснабжения в жилых и общественных зданиях отличаются периодическим характером работы источника теплоты. При этом температура воздуха в помещениях может колебаться в пределах 3...5⁰С из-за тепловой инерционности ограждающих конструкций зданий [3]. Вместе с тем максимальное потребление энергии приходится на дневное время, когда устанавливается комфортная температура (20-22⁰С). Анализ современных энергоактивных конструкций ограждения показывает, что традиционные системы утепления с использованием теплоизоляционного материала являются малоэффективными. Характер энергосбережения в конструкциях ограждения носит пассивный характер. Для повышения энергоэффективности жилых зданий возникает необходимость разработки новых систем и конструкций ограждения с возможностями использования возобновляемых источников энергии для потребностей зданий и возмещения части тепла, затрачиваемого на отопление здания. Для этого необходимо изучить теплообменные процессы в конструкциях здания [3,4].

Методы исследования

При проведении теоретических исследований использованы стандартные методы теплотехнического расчета ограждающих конструкций зданий с теплотехническими неоднородностями (воздушными прослойками) и методика расчета температурных полей в энергоактивной ограждающей конструкции.

Для изучения процессов теплообмена при фазовом переходе теплоаккумулирующего материала в энергоактивных ограждающих конструкциях разработана математическая модель, которая учитывает теплофизические свойства материала, толщину слоя фазового перехода и время ее образования, а также разность температур между температурой исходного состояния и температурой фазового перехода теплоаккумулирующего материала.

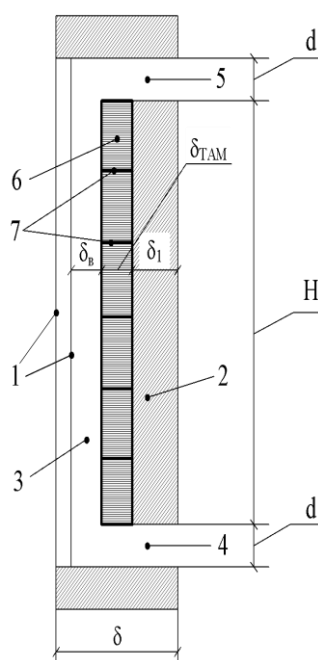
Обсуждение

Для изучения теплообменных процессов исследована энергоактивная ограждающая конструкция со следующими параметрами (таблица 1).

Таблица 1 - Параметры энергоактивной ограждающей конструкций

Параметр	Схема 3
Толщина несущего слоя, δ_1 , мм	300
Толщина энергоактивной панели, $\delta_{там}$, мм	100
Ширина зазора воздуха, δ_v , мм	120

Толщина оконного стекла δ_{gl} , мм	4
Расстояние между стеклами, $\delta_{в gl}$, мм	12
Толщина инклюзивов, мм	2
Высота энергоактивной панели H , мм	1400
Материал несущего слоя	кирпичная кладка
Материал высокотеплопроводящих инклюзивов	сталь
Теплопроводность ТАМ, Вт/(м·К)	0,26
Теплоемкость ТАМ, кДж/(кг·К)	3
Плотность ТАМ, кг/м ³	900
Температура плавления ТАМ, °С	28–41
Удельная теплота плавления ТАМ, кДж/кг	200



1 – стеклопакет, 2 – несущий слой, 3 – воздушный зазор, 4 – подводный канал, 5 – отводящий канал, 6 – ТАМ, 7 – высокотеплопроводящие инклюзивы

Рисунок 1 - Энергоактивная ограждающая конструкция

Рассмотрим процесс фазового перехода теплоаккумулирующего материала в ограждающих конструкциях, представляя геометрию слоя, в соответствии с целью исследования, плоской. При этом учтем следующие предпосылки и допущения, которые необходимы для упрощения математической модели процесса фазового перехода. Агрегатное состояние теплоаккумулирующего материала в толще слое будем рассматривать в виде прослойки твердой и жидкой фазы. Будем считать, что переход из одной фазы в другую сопровождается конвективным теплообменом и теплопроводностью (кондуктивный теплообмен).

Учет увеличения интенсивности теплообмена в жидкой фазе теплоаккумулирующего материала по сравнению с теплопроводностью производим посредством использования коэффициента конвекции [6]:

$$\varepsilon = 0,18(G_{\gamma} \cdot P\gamma)^{0,25} \quad (1)$$

Интенсивность поглощения теплоты при фазовом переходе материала существенно превышает подвод тепла из нее за счет теплопроводности (кондуктивным теплообменом), поэтому будем считать, что размеры зоны фазового перехода стремятся к минимуму.

Процесс фазового перехода термоаккумулирующего материала осуществляется в малом объеме. В этом объеме фазового превращения тепловой поток q_1 , проходящий от поверхности раздела в другой фазовый переход, будет определяться выражением

$$q_1 = q_\phi + q_2$$

где q_ϕ - тепловой поток через слой фазового перехода, q_2 - тепловой поток, подводимый из исходной фазы к поверхности слоя с фазовым переходом.

В начальной, исходной фазе градиент температуры можно принять равным нулю. Тогда тепловой поток, проводимый из исходной фазы, будет примерно равен нулю $q_2 \approx 0$. Считается, что градиент температуры в новой фазе будет зависеть от характера распределения температур. В плоском слое ограждения распределение температур на поверхностях слоя принимается линейным. Отметим, что градиент температур в новой фазе можно принять равным градиенту температур при стационарной безфазовой теплопроводности.

Для плоскостей теплового потока q_ϕ фазового перехода и потока q_2 , подводимого к поверхности слоя фазового перехода будут справедливыми, согласно [7, 8], следующие формулы:

$$q_\phi = \gamma \cdot \rho_1 \cdot \frac{dx}{d\tau}; \quad (2)$$

$$q_2 = -\lambda_2 \cdot \frac{dt_2}{dx} \Big|_{x=L_2} \quad (3)$$

где γ - удельная теплота фазового перехода; ρ_1 - плотность начальной фазы; $\frac{dx}{d\tau}$ - скорость распространения новой фазы; $\frac{dt_2}{dx}$ - градиент температуры в начальной фазе.

Плотность теплового потока в новой фазе будет равна:

$$q_1 = -\lambda_1 \cdot \frac{dt_1}{dx} \Big|_{x=\delta} \quad (4)$$

где λ_1 - коэффициент теплопроводности термоаккумулирующего материала; $\frac{dt_1}{dx}$ - градиент температуры в новой, измененной фазе.

Заменим градиент температуры средним градиентом по толщине δ - новой, измененной фазы

$$\frac{dt_1}{dx} \Big|_{x=\delta} = \frac{t_3 - t_{w1}}{\delta}, \quad (5)$$

где t_3, t_{w1} - температуры фазового перехода и охлаждающей среды.

Приравнивая правые части уравнения (2) и (4) и учитывая (5) получим следующее обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\delta \cdot d\delta = \frac{\lambda_1 \cdot (t_3 - t_{w1}) dt}{\gamma \cdot \rho_1} \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (6) в пределах толщины слоя в новой фазе δ и времени его образования τ

$$\int_0^{\delta} \delta \cdot d\delta = \frac{\lambda_1}{\gamma \cdot \rho_1} (t_3 - t_{w1}) \int_0^{\tau} d\tau, \quad (7)$$

Получим соотношение между толщиной слоя новой фазы, временем ее образования, разностью температур и теплофизическими свойствами теплоаккумулирующего материала в виде:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\lambda_1 \cdot (t_3 - t_{w1}) \tau}{\gamma \cdot \rho_1}} = \sqrt{\frac{2a_1 \cdot c_1 (t_3 - t_{w1}) \cdot \tau}{\gamma}} \quad (8)$$

где a_1 - коэффициент температуропроводности новой фазы, c_1 - удельная теплоемкость новой фазы.

Из соотношения (8) может быть найдено время образования новой фазы в зависимости от толщины слоя новой фазы, разности температур и теплофизических свойств теплоаккумулирующего материала в виде:

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{\gamma \rho_1 \delta^2}{\lambda_1 (t_3 - t_{w1})} = \frac{1}{2} \frac{\gamma \delta^2}{a_1 c_1 (t_3 - t_{w1})} \quad (9)$$

Подставив в выражение плотности теплового потока (4) значение δ из формулы (8) и учитывая условие (5) можно получить выражение для теплового потока

$$q = \frac{\lambda \Delta t}{\delta} = \sqrt{\frac{ac \cdot \rho^2 \Delta t \cdot \nu}{2\tau}} \quad (10)$$

Характер формулы (10) показывает, что плотность теплового потока изменяется от большого числа параметров от начального момента времени τ до времени процесса перехода в новую фазу τ_δ .

Средняя за время процесса фазового перехода материала плотность теплового потока может быть определена интегрированием по толщине слоя δ :

$$q_\phi = \frac{1}{\tau_\delta} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \nu \rho \Delta T}{2}} \int_0^{\delta} \frac{dt}{\sqrt{\tau}} = 2 \sqrt{\frac{\lambda \nu \rho \Delta T}{2\tau_\delta}} \quad (11)$$

Результаты

Сравнение формул (10) и (11) показывает, что средняя плотность теплового потока в процессе

плавления слоя теплоаккумулирующего материала в два раза больше, чем плотность теплового потока в момент времени, при котором граница раздела фаз переместится на расстояние δ .

Выводы

Представленная математическая модель теплообмена при фазовом переходе теплоаккумулирующего материала учитывает теплофизические свойства материала, толщину слоя фазового перехода и время ее образования, а также разность температур между температурой исходного состояния и температурой фазового перехода теплоаккумулирующего материала.

Список литературы

1. Aimbetova I.O., Suleimenov U.S., Kostikov O.A., Ristavletov R.A. Development of heat storage materials based on commodity paraffins //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. - № 6(444). – P. 6-13. <https://www.scopus.com/sourceid/21100781874> CiteScore 2019=0,8. Earth and Planetary Sciences - 26 перцентиль, H Index-7, Scopus. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.124>
2. Aimbetova I.O., Suleimenov U., Ristavletov R., Baigenzhenov O. Study of shrinkage of heat storage materials for building envelope structures //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2020. - 62-66 pp. <https://www.scopus.com/sourceid/19700200831> CiteScore 2019=0,6. General Engineering - 25 перцентиль, H Index-31, Scopus. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062066>
3. Фраас А., Описик М. Расчет и конструирование теплообменников: учебник (пер. с англ.). – М.: Атомиздат, 2011. -356 с.
4. Протасевич А.М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений: учебное пособие /Протасевич А.М. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. - 240 с.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. СН РК 2.04-04-2011 «Тепловая защита зданий». Агентство Республики Казахстан по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства. – Астана, 2012. – 50 с.
7. Сотникова О.А. Экономическая эффективность использования солнечных систем горячего водоснабжения /О.А. Сотникова, Д.М. Чудинов //АВОК. – 2007 - № 2. – С. 88-94.
8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. -М.: Энергия, 1980. -220с.

**Р.Б. Құдабаев¹, А.А. Жумабаев², У.С. Сүлейменов¹, М.А. Қамбаров¹,
Р.А. Риставлетов¹, Э.Н. Калшабекова¹**

¹М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

Жылуаккумуляциялаушы материалдың фазалық ауысуы кезіндегі жылу берудің математикалық моделі

Аңдатпа. Парафиндерді құрылыс конструкцияларында жылу аккумуляторы ретінде қолдану олардың фазалық ауысу температураларының жоғары және жылуөткізгіштік коэффициентінің төмен болуына байланысты қиындық туғызады, сонымен қатар, энергиябелсенді конструкцияларда жылу оқшаулағыш материалды қолданатын дәстүрлі оқшаулау жүйелері тиімсіз болып табылады. Тұрғын үйлердің энергия тиімділігін жоғарылату үшін табиғаты белсенді және ғимараттардың қажеттіліктері үшін жаңартылатын энергия көздерін пайдалану

мүмкіндігіне ие, сонымен қатар жұмсалған жылудың бір бөлігін өтеуге мүмкіндік беретін жаңа жүйелер мен қоршау конструкцияларын жасау қажеттілігі туындайды. Ол үшін құрылыс конструкцияларындағы жылу алмасу процестерін зерттеу қажет.

Мақалада қоршау конструкцияларындағы жылу аккумуляциялайтын материалдың фазалық ауысу процестерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Қоршау конструкцияларындағы жылу аккумуляциялайтын материалдың фазалық ауысу процестері, фазалық ауысу процесінің математикалық моделін жеңілдеті үшін қажетті алғышарттар мен болжамдар ескерілген. Материалдың жылуфизикалық қасиеттерін, фазалық ауысу қабатының қалыңдығын және оның пайда болу уақытын, сондай-ақ температура айырмашылығын және бастапқы күй температурасы мен жылу сақтайтын материалдың фазалық ауысу температурасы арасындағы айырмашылықты ескеретін жылу аккумуляциялаушы материалдың фазалық ауысуы кезіндегі жылу беру математикалық моделі жасалды. Жылу ағынының тығыздығы уқыттың бастапқы сәтінен бастап жаңа фазаға ауысу уақытына дейін көптеген параметрлерден өзгертіндігі анықталды және жылу аккумуляциялаушы материал фаза шекарасы қашықтықты жылжитатын сәтте жылу ағынының тығыздығынан екі есе жоғары болады.

Кілт сөздер: энергактивті қоршау конструкциясы, жылу аккумуляциялаушы материалдар, жылу алмасу, фазалық ауысу, жылуфизикалық қасиеттер, жылу ағыны, жылумен жабдықтау, ғимараттарды оқшаулау жүйелері, жаңартылатын энергия көздері, фазалық ауысу қабатының қалыңдығы.

*R.B. Kudabaev¹, A.A. Jumabayev², U.S. Suleimenov¹, M.A. Kambarov¹,
R.A. Ristavletov¹, E.N. Kalshabekova¹*

¹M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

Mathematical model of heat transfers during phase transition of heat storage material

Abstract. The use of paraffin as heat accumulators in building envelopes is difficult due to the rather high temperature of their phase transition, and low coefficient of thermal conductivity. Besides, traditional insulation systems using heat-insulating material in energy-active structures are ineffective. To improve the energy efficiency of residential buildings, it becomes necessary to develop new systems and structures of fencing, which is active in nature and can use renewable energy sources for the needs of buildings. It will also reimburse part of the heat spent on heating the building. For this, it is necessary to study the heat exchange processes in the building structures.

The article presents the results of studying the processes of phase transition of heat storage material in enclosing structures. The article considers processes of phase transition of heat storage material in enclosing structures, considering the prerequisites and assumptions. They are necessary to simplify the mathematical model of the phase transition process. The authors have been developed a mathematical model of heat transfer during the phase transition of a heat storage material, which considers the thermophysical properties of the material, the thickness of the phase transition layer and the time of its formation, as well as the temperature difference between the temperature of the initial state and the temperature of the phase transition of the heat storage material. It was found that the heat flux density varies in many parameters from the initial moment of time to the time of the process of transition to a new phase and it is determined that the average heat flux density during the melting of a layer of heat-accumulating material is two times higher than the heat flux density at the moment of time, at which the phase boundary will move a distance.

Keywords: energy-active enclosing structure, heat storage materials, heat exchange, phase transition, thermophysical properties, heat flow, heat supply, building insulation systems, renewable energy sources, phase transition layer thickness.

References

1. Aimbetova I.O., Suleimenov U.S., Kostikov O.A., Ristavletov R.A. Development of heat storage materials based on commodity paraffins //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. - № 6(444). – P. 6-13. <https://www.scopus.com/sourceid/21100781874> CiteScore 2019=0,8. Earth and Planetary Sciences - 26 процентиль, H Index-7, Scopus. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.124>
2. Aimbetova I.O., Suleimenov U., Ristavletov R., Baigenzhenov O. Study of shrinkage of heat storage materials for building envelope structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2020. - 62-66 pp. <https://www.scopus.com/sourceid/19700200831> CiteScore 2019=0,6. General Engineering - 25 процентиль, H Index-31, Scopus. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062066>
3. Fraas A., Tsitsisik M. Calculation and design of heat exchangers (trans. from English). - M.: Atomizdat, 2011. -356 p.
4. Protasevich A.M. Construction thermophysics of enclosing structures of buildings and structures: textbook / Protasevich A.M. -Minsk: Vysheyshaya shkola, 2015. - 240 p.
5. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / S. Patankar. - M.: Energoatomizdat, 1984 - 152 p.
6. SN RK 2.04-04-2011 «Thermal protection of buildings». Agency of the Republic of Kazakhstan for Construction and Housing and Communal Services. - Astana, 2012. - 50 p.
7. Sotnikova, O. A. Economic efficiency of the use of solar systems of hot water supply/ O.A. Sotnikova, D.M. Chudinov // AVOK. – 2007 - №2. - pp. 88-94.
8. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Fundamentals of heat transfer. - M.: Energiya, 1980. – 220 p.

Сведения об авторах:

Кудабаяев Р.Б. - докторант по специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, пр.Тауке-хана 5, Шымкент, Казахстан.

Джумабаев А.А. - д.т.н., профессор, Некоммерческое акционерное общество Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Сулейменов У.С. - д.т.н., профессор кафедры «Архитектура», Некоммерческое акционерное общество Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, пр.Тауке-хана 5, г.Шымкент, Казахстан.

Камбаров М.А. - к.т.н., доцент кафедры «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Некоммерческое акционерное общество Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, пр.Тауке-хана 5, г.Шымкент, Казахстан.

Риставлетов Р.А. - к.т.н., доцент кафедры «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Некоммерческое акционерное общество Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, пр.Тауке-хана 5, г.Шымкент, Казахстан.

Калшабекова Э.Н. - к.т.н., доцент кафедры «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Некоммерческое акционерное общество Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, пр.Тауке-хана 5, г.Шымкент, Казахстан.

Kudabayev R.B. - Ph.D. student in Production of building materials, products and structures, M. Auevov. South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan.

Jumabayev A.A. - Doctor of Technical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Suleimenov U.S. - Professor of the Department "Architecture", Doctor of Technical Sciences, M. Auevov South Kazakhstan State University, 5, Tauke-khan Ave., Shymkent, Kazakhstan.

Kambarov M.A. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the "Technology of building materials, products and construction", M. Auezov. South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan.

Ristavletov R.A. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the "Technology of building materials, products and construction", M. Auezov, South Kazakhstan State University, 5 Tauke-khan Ave., Shymkent, Kazakhstan.

Kalshabekova E.N. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the "Technology of building materials, products and construction", M. Auezov, South Kazakhstan State University, 5 Tauke-khan ave., Shymkent, Kazakhstan.