

Научная статья  
УДК 658.29:621.928  
doi:10.46554/1993-0453-2023-12-230-36-49

### Технико-экономическое обоснование внедрения сепарационных устройств с дугообразными элементами в реакторах с псевдооживленным слоем

Вадим Эдуардович Зинуров<sup>1</sup>, Эльмира Ильгизяровна Салахова<sup>2</sup>, Ильнур Наилович Мадышев<sup>3</sup>,  
Азалия Айратовна Абдулина<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

<sup>2,3</sup> Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Нижнекамск, Россия

<sup>1</sup> vadd\_93@mail.ru

<sup>2</sup> salahova.elmira@gmail.ru

<sup>3</sup> ilnyr\_91@mail.ru

<sup>4</sup> azalkaabdullina69826@gmail.com

**Аннотация.** В статье проведено технико-экономическое обоснование внедрения сепарационных устройств с дугообразными элементами (СУсДЭ) в реакторах с псевдооживленным слоем. Показано, что на текущий момент времени применяемые циклонные сепараторы в реакторах имеют ряд недостатков. В качестве замены предложены СУсДЭ. Представлена модель сепарационного устройства и описан механизм его работы. Схематично показана предлагаемая компоновка 6 СУсДЭ в реакторе для замены 12 циклонных сепараторов. Оценочный экономический расчет показал, что стоимость проекта по внедрению 6 СУсДЭ в реакторах оценивается в 5726 тыс. руб., что в 2,6 раза дешевле аналогов (12 циклонных сепараторов). При сравнении технических характеристик сепарационных аппаратов получено, что большинство параметров 6 СУсДЭ лучше, чем 12 циклонных сепараторов: металлоемкость 5119 кг (в 1,4 раза ниже), гидравлическое сопротивление около 3600 Па (в 2,5 раза ниже), износ катализатора и стенок аппарата ниже вследствие более низких рабочих скоростей. В ходе экономической оценки проекта по СУсДЭ рассмотрены следующие параметры: коэффициент дисконтирования  $K_d$ , дисконтирование денежных потоков DCF, чистый дисконтированный доход NPV, индекс доходности PI и дисконтированный срок окупаемости DPP. Проанализированы возможные сценарии увеличения первоначальной стоимости проекта IC до 15 000 тыс. руб. Расчет индекса доходности PI при различной первоначальной стоимости проекта IC от 5726 до 15 000 тыс. руб. показал, что он является рентабельным, т.е.  $PI > 1$ , только в тех случаях, при которых финансовые потоки в год CF с учетом амортизационных отчислений составляют не менее 1867 тыс. руб. Дисконтированный срок окупаемости проекта DPP составляет 1,4–6,6 лет при финансовых потоках в год CF, равных 1867–5500 тыс. руб. при первоначальной стоимости проекта IC, равной 5726 тыс. руб.

**Ключевые слова:** технико-экономическое обоснование, сепарационное устройство, циклонный сепаратор, дисконтированный срок окупаемости, инвестиции, чистый дисконтированный доход, индекс доходности, инновационный проект

#### Основные положения:

♦ проведено технико-экономическое обоснование внедрения сепарационных устройств с дугообразными элементами (СУсДЭ) в реактор с псевдооживленным слоем для улавливания мелкодисперсного катализатора;

♦ проведено технико-экономическое сравнение 6 СУсДЭ и 12 циклонных сепараторов по стоимости, металлоемкости, эффективности, гидравлическому сопротивлению, потребляемой мощности, годовому потреблению электроэнергии, износу катализатора и аппаратов;

♦ рассмотрено влияние первоначальной стоимости проекта по внедрению СУсДЭ в реакторах с псевдооживленным слоем от 5726 до 15 000 тыс. руб. и изменения финансовых потоков CF от 500 до 5500 тыс. руб. на изменение дисконтированного срока окупаемости проекта и индекса доходности.

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3577.2022.1.

**Для цитирования:** Технико-экономическое обоснование внедрения сепарационных устройств с дугообразными элементами в реакторах с псевдооживленным слоем / В.Э. Зинуров, Э.И. Салахова, И.Н. Мадышев, А.А. Абдуллина // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2023. № 12 (230). С. 36–49. doi:10.46554/1993-0453-2023-12-230-36-49.

Original article

### Feasibility study of the introduction of separation devices with arc-shaped elements in fluidized bed reactors

Vadim E. Zinurov<sup>1</sup>, Elmira I. Salakhova<sup>2</sup>, Ilnur N. Madyshev<sup>3</sup>, Azaliia A. Abdullina<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2,3</sup> Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia

<sup>1</sup> vadd\_93@mail.ru

<sup>2</sup> salahova.elmira@gmail.ru

<sup>3</sup> ilnyr\_91@mail.ru

<sup>4</sup> azalkaabdullina69826@gmail.com

**Abstract.** The article provides a feasibility study for the introduction of separation devices with arc-shaped elements (SDwAE) in fluidized bed reactors. It has been shown that the currently used cyclone separators in reactors have a number of disadvantages. SDwAE was proposed as a replacement. A model of a separation device is presented and the mechanism of its operation is described. The proposed arrangement of 6 SDwAE in a reactor to replace 12 cyclone separators is shown schematically. An estimated economic calculation showed that the cost of the project for the implementation of 6 SDwAE in reactors is estimated at 5,726 thousand rubles, which is 2.6 times cheaper than analogues (12 cyclone separators). When comparing the technical characteristics of separation devices, it was found that most of the parameters of 6 SDwAE are better than 12 cyclone separators: metal consumption 5119 kg (1.4 times lower), hydraulic resistance of about 3600 Pa (2.5 times lower), wear of the catalyst and walls device is lower due to lower operating speeds. In the course of the economic assessment of the project using the SDwAE, the following parameters were considered: discount factor Kd, discounted cash flows DCF, net present value NPV, profitability index PI and discounted payback period DPP. Possible scenarios for increasing IC to 15,000 thousand rubles are analyzed. Calculation of the profitability index PI for different initial costs of the IC project from 5726 to 15000 thousand rubles. showed that it is cost-effective, i.e.  $PI > 1$ , only in those cases in which financial flows per year CF, considering depreciation charges, are at least 1867 thousand rubles. The discounted payback period of the DPP project is 1.4 - 6.6 years with financial flows per year CF equal to 1867 - 5500 thousand rubles. with the initial cost of the IC project equal to 5726 thousand rubles..

**Keywords:** feasibility study, separation device, cyclone separator, discounted payback period, investment, net present value, profitability index, innovative project

**Highlights:**

- ◆ the feasibility study was carried out for the introduction of separation devices with arc-shaped elements (SDwAE) into a fluidized bed reactor to capture finely dispersed catalyst;
- ◆ technical and economic comparison of 6 SDwAE and 12 cyclone separators was carried out in terms of cost, metal consumption, efficiency, hydraulic resistance, power consumption, annual electricity consumption, wear of the catalyst and apparatus;
- ◆ the impact of the initial cost of the project for the implementation of SDwAE in fluidized bed reactors from 5,726 to 15,000 thousand rubles was considered. and changes in financial flows CF from 500 to 5500 thousand rubles. to change the discounted payback period of the project and the profitability index.

**Acknowledgments:** the work was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and graduate students SP-3577.2022.1.

**For citation:** Feasibility study of the introduction of separation devices with arc-shaped elements in fluidized bed reactors / V.E. Zinurov, E.I. Salakhova, I.N. Madyshev, A.A. Abdullina // Vestnik of Samara State University of Economics. 2023. No. 12 (230). Pp. 36–49. (In Russ.). doi:10.46554/1993-0453-2023-12-230-36-49.

**Введение**

Внедрение инновационного оборудования на промышленных предприятиях с целью повышения эффективности производственных процессов, оптимизации использования ресурсов, повышения качества конечной продукции и увеличения денежных потоков является актуальной задачей [1, 2]. Однако успешное внедрение инновационных технологий подразумевает не только достижение преимуществ, но и минимизацию возможных рисков, которые могут привести к отрицательным экономическим эффектам [3, 4]. Для их минимизации одним из ключевых аспектов является комплексный анализ, включающий проведение объективного сравнительного исследования технических и финансовых характеристик при внедрении нового оборудования взамен используемому. Технический анализ включает в себя оценку параметров инновационного оборудования, необходимых для функционирования технологических процессов. Финансовый анализ включает в себя проведение расчетов на приобретение, монтаж и обслуживание инновационного оборудования. Также осуществляется прогнозирование экономических эффектов в долгосрочной перспективе. На основе сравнения стоимости внедрения инновационного оборудования на промышленном предприятии с ожидаемыми финансовыми выгодами проводится экономическое обоснование данного проекта с возможностью его реализации. Анализ научных публика-

ций показывает широкую применимость данных методов. В работе [5] авторы проводят экономическую оценку внедрения безотходных технологий на примере производства сухого молока. На основе расчета годового экономического эффекта и срока окупаемости капитальных вложений доказываем перспективность применения роторного аппарата. В статье [6] проводится экономическое обоснование оптимального решения при создании транспортного беспилотного летательного аппарата. В работах [7–10] проводятся технико-экономические оценки разработки устройства для профилактики остановки дыхания во время сна, применения новой аддитивной технологии, применения мультивихревого классификатора-сепаратора и выбора профиля сетчато-поточной пластины теплообменника. Таким образом, экономическое обоснование внедрения инновационного оборудования на предприятиях является важной составляющей для его комплексной оценки.

Одна из таких задач стоит перед предприятиями, которые используют в своих технологических линиях реакторы с псевдоожиженным слоем, применяемые, например, для получения олефинов, впоследствии используемые для производства полиэтилена, поликарбонатов, клеев, спирта и пр., путем дегидрирования изопарафинов [11]. Для повышения эффективности данной химической реакции в реакторах используется катализатор в виде мелкодисперсного сыпучего материала, который

находится в псевдооживленном состоянии (в подвешенном состоянии, при котором частицы катализатора не оседают на дно реактора и не улетают из него). Концентрация частиц в реакторе высокая, что приводит к их истиранию при постоянном соударении друг об друга. В итоге размер частиц уменьшается, и они уносятся газом из реактора. Вследствие дороговизны катализатора и требований по экологической безопасности он улавливается пылеуловительной системой, которая находится на выходе из реактора, и возвращается в зону реакции. Система улавливания частиц катализатора представляет собой, как правило, циклонные сепараторы (рис. 1, а). При течении газового потока с частицами катализатора в них формируются быстро вращающиеся вихри [12]. В результате частицы вылетают из газа в сторону цилиндрических стенок и после контакта с ними падают вниз и возвращаются в зону реакции. Недостатками циклонных сепараторов являются высокое гидравлическое сопротивление и абразивный износ стенок, приводящий к множеству щелей в них, в результате эффективность улавливания снижается и возрастают экономические издержки,

так как в реакторе всегда поддерживается определенная концентрация катализатора.

Авторами работы предлагается заменить циклонные сепараторы в реакторах с псевдооживленным слоем на сепарационные устройства с дугообразными элементами (СУсДЭ) [13]. Каждое такое устройство представляет собой множество дугообразных элементов 2, располагающихся в шахматном порядке, которые вставляются в сепарационную решетку 4, заключенные в корпус 3 (рис. 1, б). СУсДЭ имеет отверстия для входа 1 газового потока с частицами и выхода 8 очищенного газа, бункер 7 для ссыпания частиц катализатора и впоследствии возврата его в рабочую зону реактора.

Принцип действия СУсДЭ основан на возникновении волнообразной структуры газового потока с частицами при огибании сепарационных элементов [14]. При резком изменении направления движения газа частицы катализатора по инерции выбиваются из его структуры и сталкиваются с дугообразными элементами, после контакта с которыми падают вниз в бункер. Далее возвращаются в рабочую зону реактора.

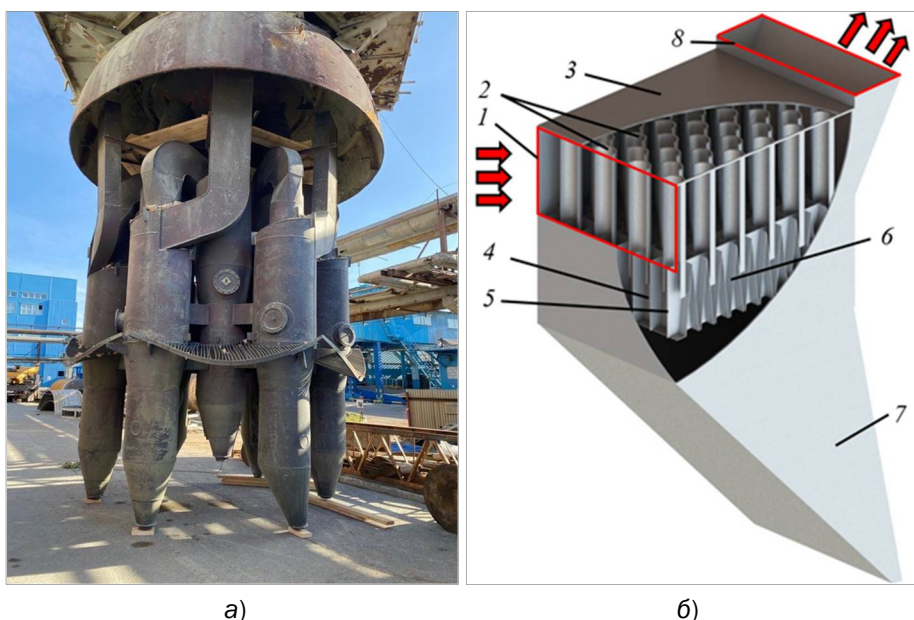


Рис. 1. Устройства для улавливания частиц катализатора в реакторе с псевдооживленным слоем:

- а) циклонные сепараторы; б) СУсДЭ (вид с разрезом): 1 – отверстие для входа запыленного газового потока; 2 – дугообразные элементы; 3 – корпус устройства; 4 – сепарационная решетка; 5 – продольные пластины; 6 – V-образные пластины; 7 – бункер; 8 – отверстие для выхода очищенного газового потока

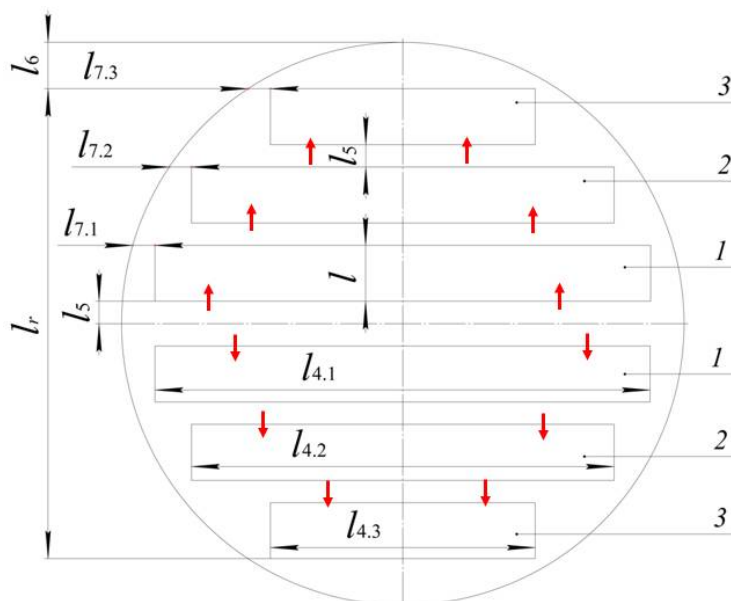


Рис. 2. Расположение СУсДЭ в реакторе (вид сверху)

Преимуществом применения СУсДЭ относительно циклонных сепараторов является достижение сопоставимой эффективности улавливания частиц катализатора при относительно низких входных скоростях газа, составляющих менее 2 м/с. В циклонах входная скорость должна составлять в разы больше. В противном случае центробежных сил недостаточно для выбивания мелкодисперсных частиц катализатора. Таким образом, при малых входных скоростях в СУсДЭ достигается низкое гидравлическое сопротивление, существенно уменьшается абразивный износ устройства и истирание частиц при их контакте со стенками.

Целью данной работы является проведение технико-экономического обоснования внедрения СУсДЭ в реакторах с псевдоожиженным слоем.

Ранее проведенный расчет по инженерной методике показал, что для замены циклонных сепараторов в реакторе необходимо 6 СУсДЭ. Их расположение в верхней части реактора на выходе из него представлено на рис. 2. Ожидается, что будет установлено 3 парных СУсДЭ одинаковой ширины  $l_{4.i}$ , где  $i$  – порядковый номер парно расположенных СУсДЭ относительно центра реактора (для данного случая  $i$  изменяется от 1 до 3). Схематично реактор делится на две полуокружности.

Входные отверстия СУсДЭ направлены к центру реактора. Таким образом, газовый поток с частицами катализатора, поднимаясь в реакторе до СУсДЭ, в зависимости от их расположения в верхней или нижней полуокружности входит в сепарационные устройства слева направо от центра реактора или наоборот. С отдалением парных СУсДЭ от центра реактора их ширина  $l_{4.i}$  уменьшается.

### Методы

Внедрение СУсДЭ на промышленном предприятии требует детального технико-экономического обоснования, которое основано на различных методах оценки инвестиций [15]. На текущий момент времени к наиболее ключевым методам относят дисконтирование денежных потоков, срок окупаемости инвестиций, коэффициент эффективности, рентабельность инвестиций, чистая текущая стоимость и др. В основе всех представленных методов лежит сравнение денежных потоков, направленных на инвестиции в проект, и будущих финансовых поступлений от проекта [16, 17].

В ходе технико-экономического обоснования данного проекта рассчитывались коэффициент дисконтирования  $K_d$ , дисконтирование денежных потоков DCF, чистый дисконтированный доход NPV, индекс доходности PI и дисконтированный срок окупаемости DPP.

Коэффициент дисконтирования  $K_d$ , позволяющий спрогнозировать стоимость будущих денежных сумм к эквиваленту на текущее время, вычислялся по выражению (1):

$$K_d = \frac{1}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

где  $r$  – ставка дисконтирования;

$t$  – период (год) реализации проекта по внедрению СУсДЭ.

В общем случае ставка дисконтирования зависит от ликвидности промышленного предприятия и его финансового положения в целом. Также оцениваются рыночные ставки, риски проекта и пр. Учитывая, что в данной работе внедрение инновационного оборудования планируется не на конкретном заводе, рассматривается любое предприятие, которое использует в технологической линии реактор с псевдооживленным слоем, то для расчетов примем  $r = 0,16$ .

Дисконтирование денежных потоков DCF, позволяющее оценить стоимость инвестиций на основе будущих финансовых потоков, приведенных к их эквиваленту в настоящее время, рассчитывалось по выражению (2):

$$DCF = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (2)$$

где  $CF_t$  – финансовые потоки в год, включая амортизационные отчисления, тыс. руб.

Чистый дисконтированный доход NPV (тыс. руб.), позволяющий оценить разницу между общими дисконтированными доходами и суммарными дисконтированными затратами инвестиционного проекта за определенный промежуток времени, вычислялся по выражению (3):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - |IC|, \quad (3)$$

где  $IC$  – денежные инвестиции в проект в начальный момент времени, тыс. руб.

Индекс доходности PI, позволяющий оценить доходность инвестиционного проекта, рассчитывается по выражению (4). При этом проект является рентабельным в случае  $PI \geq 1$ .

$$PI = \frac{NPV}{IC} + 1. \quad (4)$$

Дисконтированный срок окупаемости DPP, позволяющий определить количество времени, необходимое для того, чтобы дисконтированные денежные потоки инвестиции покрыли первоначальные затраты на нее, рассчитывается по выражению (5):

$$DPP = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq IC, \quad (5)$$

Оценочную стоимость внедрения СУсДЭ в реактор с псевдооживленным слоем можно рассчитать по выражению (6):

$$K = K_{\text{мат}} + K_n + K_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{мат}}$  – материальные затраты, тыс. руб.;

$K_n$  – накладные расходы, тыс. руб.;

$K_{\text{пр}}$  – прочие расходы, тыс. руб.

К материальным затратам относят расходы, связанные с приобретением и использованием материалов для изготовления СУсДЭ. В данном случае операционные расходы, направленные на разработку конструкторской документации СУсДЭ, которая напрямую была использована в процессе его изготовления относилась также к материальным затратам. Стоимость изготовления 6 СУсДЭ, согласно представленной на рис. 2 схеме, отражена в табл. 1, составляет около 3577,9 тыс. руб.

Таблица 1

Стоимость изготовления 6 СУсДЭ

№ п/п	Элементы	Количество, шт.	Стоимость стали 12X18H10T, тыс. руб.	Стоимость гибки металла, тыс. руб.	Стоимость резки металла, тыс. руб.
1	Дугообразные элементы	3240	241	55	42
2	Продольные пластины	270	73	–	8
3	Поперечные V-образные пластины	132	315	18	7
4	Корпус устройства	6	255	16	4
5	Бункер устройства	6	140	–	4
Итого			1023,7	89,5	64,7
Сварочные работы, тыс. руб.			100		
Стоимость разработки проекта, тыс. руб.			1500		
Дополнительные услуги, тыс. руб.			800		
Общая стоимость, тыс. руб.			3578		

Стоит отметить, что в дополнительные услуги в том числе входят транспортно-заготовительные расходы.

Таким образом, оценочный расчет изготовления 6 СУсДЭ проводился на основе суммы стоимости стали 12Х18Н10Т, гибки и лазерной резки металла, сварки, стоимости разработки проекта и дополнительных услуг.

Стоимость стали 12Х18Н10Т С, требуемой для изготовления 6 СУсДЭ (тыс. руб.) вычислялась по выражению (7):

$$C = mC_{12Х18Н10Т}, \quad (7)$$

где  $m$  – масса стали 12Х18Н10Т, которая требуется для изготовления 6 СУсДЭ, кг;

$C_{12Х18Н10Т}$  – стоимость 1 кг стали, тыс. руб.

На основе открытых данных принималось, что  $C_{12Х18Н10Т}$  составляет 0,2 тыс. руб.

Общая масса стали  $m$  (кг) рассчитывается по выражению (8):

$$m = m_d + m_p + m_v + m_b + m_h, \quad (8)$$

где  $m_d$ ,  $m_p$ ,  $m_v$ ,  $m_b$ , и  $m_h$  – требуемая масса стали на изготовление дугообразных элементов (9), продольных пластин (10), V-образных пластин (11), корпуса (12) и бункера (13) соответственно, кг.

$$m_d = \pi d n_1 \rho_m h_d \delta_1 \sum_{i=1}^{n_3} n_{2,i}, \quad (9)$$

где  $d$  – диаметр элементов, м;

$n_1$  – количество рядов дугообразных элементов в одном СУ;

$\rho_m$  – плотность стали 12Х18Н10Т, кг/м<sup>3</sup>;

$h_d$  – высота дугообразных элементов, м;

$\delta_1$  – толщина дугообразных элементов, м;

$n_{2,i}$  – количество дугообразных элементов в одном ряду  $i$ -ого СУ;

$n_3$  – количество пар СУ в реакторе.

$$m_p = 2\rho_m h_p l_p \delta_p \sum_{i=1}^{n_3} n_{2,i}, \quad (10)$$

где  $h_p$ ,  $l_p$ ,  $\delta_p$  – высота, ширина и толщина продольных пластин в СУ соответственно, м.

$$m_v = 2\rho_m [2\delta_v h_v (n_1 - 1) + \delta_{v,1} b_{v,1} + \delta_{v,2} b_{v,2}] \sum_{i=1}^{n_3} l_{4,i}, \quad (11)$$

где  $\delta_v$ ,  $h_v$  – толщина и высота поперечных V-образных пластин соответственно, м;

$\delta_{v,1}$ ,  $h_{v,1}$  – толщина и длина пластин первого ряда V-образных пластин, расположенных в их нижней части, соответственно, м;

$\delta_{v,2}$ ,  $h_{v,2}$  – толщина и длина пластин последнего ряда V-образных пластин, располо-

женных в их нижней части, соответственно, м;

$l_{4,i}$  – ширина  $i$ -ого сепарационного устройства, м.

$$m_b = 2\rho_m (2\delta_{b,2} h_{b,2} n_3 l + \sum_{i=1}^{n_3} l_{4,i} [\delta_{b,1} h_{b,1} + \delta_{b,3} h_{b,3} + \delta_{b,4} n_3 l]), \quad (12)$$

где  $\delta_{b,1}$ ,  $h_{b,1}$  – толщина и высота пластин корпуса, расположенных навстречу потоку, соответственно, м;

$\delta_{b,2}$ ,  $h_{b,2}$  – толщина и высота боковых пластин корпуса соответственно, м;

$l$  – ширина 1 СУ, м;

$\delta_{b,3}$ ,  $h_{b,3}$  – толщина и высота задних пластин корпуса соответственно, м;

$\delta_{b,4}$  – толщина верхних пластин корпуса, м.

$$m_h = 2\rho_m (2\delta_{h,2} h_{h,2} n_3 l + [\delta_{h,1} h_{h,1} + \delta_{h,3} h_{h,3}] \sum_{i=1}^{n_3} l_{4,i}), \quad (13)$$

где  $\delta_{h,1}$ ,  $h_{h,1}$  – толщина и высота пластин бункера, расположенных навстречу потоку, соответственно, м;

$\delta_{h,2}$ ,  $h_{h,2}$  – толщина и высота боковых пластин бункера соответственно, м;

$\delta_{h,3}$ ,  $h_{h,3}$  – толщина и высота задних пластин бункера соответственно, м.

На основе ранее проведенных расчетов по инженерной методике и справочных данных было установлено, что:

$$\begin{aligned} d &= 0,05 \text{ м}, \rho_m = 7900 \text{ кг/м}^3, n_1 = 12, \\ \delta_1 &= 0,003 \text{ м}, n_{2,1} = 55, n_{2,2} = 48, n_{2,3} = 32, \\ \delta_p &= 0,002 \text{ м}, \delta_v = 0,002 \text{ м}, \delta_b = 0,002 \text{ м}, \\ \delta_h &= 0,002 \text{ м}, l_{4,1} = 5,5 \text{ м}, l_{4,2} = 4,8 \text{ м}, \\ l_{4,3} &= 3,2 \text{ м}, h_{b,1} = 0,475 \text{ м}, h_{b,2} = 0,506 \text{ м}, \\ h_{b,3} &= 0,506 \text{ м}, l = 0,623 \text{ м}, h_{h,1} = 0,82 \text{ м}, \\ h_{h,2} &= 0,605 \text{ м}, h_{h,3} = 0,680 \text{ м}, \\ l_p &= 0,5013 \text{ м}, h_p = 0,17 \text{ м}, h_v = 0,166 \text{ м}, \\ b_{v,1} &= 0,027 \text{ м}, b_{v,2} = 0,011 \text{ м}. \end{aligned}$$

При расчетах стоимость гибки металла принималась равной 17 руб./шт. для дугообразных элементов, гибка металла листов различной длины составляла от 20 руб. Лазерная резка нержавеющей стали принималась от 40 руб./1 п.м. в зависимости от толщины. Сварочные работы в совокупности оценивались в 100 тыс. руб.

Накладные расходы  $K_n$  принимались как 40% от материальных затрат. Прочие расходы принимала как 20% от материальных затрат проекта. Таким образом,  $K_n = 1432$  тыс. руб.,

$K_{пр} = 716$  тыс. руб. Общие расходы  $K$ , рассчитанные по формуле (6), составили 5726 тыс. руб.

Финансовые потоки в год CF от внедрения СУсДЭ в реактор с псевдооживленным слоем рассчитать практически невозможно. С одной стороны, сепарационные устройства в реакторах позволяют сохранять катализатор, т.е. экономить важный дорогостоящий материал. С другой стороны, не уловленные сепарационными аппаратами частицы могут попасть в окружающую среду, что приводит к негативным экологическим последствиям. В общем случае такие данные являются коммерческой тайной. При этом известно, что стоимость катализатора 20 т составляет около 2 млн руб., в реакторе находится около 240 т. Как отмечалось ранее, на текущий момент в реакторах используются циклонные сепараторы. Относительно предлагаемых СУсДЭ они обладают более высоким гидравлическим сопротивлением, соответственно, энергетические затраты на прокачку газового потока через них возрастают. Ввиду более высоких рабочих скоростей в циклонных сепараторах их износ достаточно интенсивный. Эксплуатационный срок циклонных сепараторов составляет около 10 лет. Учитывая повышенную нагрузку на них в реакторах с псевдооживленным слоем, реальный их износ происходит быстрее. На основе анализа данной информации было рассмотрено, что финансовые потоки в год CF от внедрения СУсДЭ, включая амортизационные отчисления, составляют от 500 до 5500 тыс. руб. Как показано выше, денежные инвести-

ции в проект в начальный момент времени IC составляют около 5726 тыс. руб. В случае подорожания материалов стоимость может возрасти. Для оценки данного негативного сценария в расчетах IC рассматривался от 5726 до ориентировочной стоимости циклонных сепараторов на данный момент времени – 15000 тыс. руб.

При сравнении технических характеристик принималось, что гидравлическое сопротивление 12 циклонных сепараторов в реакторе (используется 6 пар последовательно установленных циклонных) составляет около 9000 Па (гидравлическое сопротивление 1 циклона около 1500 Па), гидравлическое сопротивление 6 СУсДЭ составляет около 3600 Па (гидравлическое сопротивление 1 СУсДЭ составляет менее 600 Па).

Энергетические затраты  $N$  (кВт) определялись по выражению (14):

$$N = \frac{Q \Delta p}{1000 \eta}, \quad (14)$$

где  $Q$  – расход газа с частицами катализатора, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta p$  – гидравлическое сопротивление аппаратов, Па;

$\eta$  – коэффициент полезного действия вентиляторного агрегата.

Годовое потребление электроэнергии  $N_r$  (кВт·ч) определялось по выражению (15):

$$N_r = N \tau, \quad (15)$$

где  $\tau$  – время работы в году, ч.

В ходе расчетов  $Q$  принималось равным 1,7 м<sup>3</sup>/с,  $\tau$  составляло 8520 ч.

Таблица 2

**Начисление годовой амортизации при реализации проекта по внедрению СУсДЭ на промышленном предприятии**

Срок полезного использования, год	Остаточная стоимость на начало года, тыс. руб.	$H_a$ , %	Сумма годовых амортизационных отчислений, тыс. руб.	Балансовая стоимость, руб.
1	5726	10	572,6	5153,4
2	5153,4			4580,8
3	4580,8			4008,2
4	4008,2			3435,6
5	3435,6			2863
6	2863,0			2 290
7	2290,4			1717,8
8	1717,8			1145,2
9	1145,2			572,6
10	572,6			0



При внедрении СУсДЭ в реактор с псевдоожиженным слоем ежегодная сумма амортизации  $A_{\text{год}}$  рассчитывается по выражению (16):

$$A_{\text{год}} = \frac{C_n H_a}{100\%}, \quad (16)$$

где  $C_n$  – первоначальная стоимость устройства, руб.;

$H_a$  – норма амортизации, %.

Для расчета  $H_a$  применяется выражение (17):

$$H_a = \frac{1}{N} 100\%, \quad (17)$$

где  $N$  – срок полезного использования мультивихревого сепаратора, год.

Примем срок полезного использования СУсДЭ аналогично циклонным сепараторам – 10 лет. В таком случае ежегодная сумма амортизации, рассчитанная линейным способом, будет следующей (табл. 2).

### Результаты

Технико-экономическое сравнение 6 СУсДЭ и циклонных сепараторов показало, что оценочная стоимость реализации проекта по внедрению СУсДЭ в реактор с псевдоожиженным слоем ниже стоимости проекта по циклонным сепараторам в 2,6 раза, экономия может составить до 9274 тыс. руб. При этом металлоемкость 6 СУсДЭ, рассчитанная по формуле (8), ниже, чем у 12 циклонных сепараторов в 1,4 раза. Высокая эффективность улавливания катализатора достигается обоими типами аппаратов. Однако при использовании СУсДЭ необходимым требованием является скорость газопылевого потока менее 2 м/с, при использовании циклонных сепараторов скорость газопылевого потока должна составлять в разы большие значения. Данные осо-

бенности влияют на гидравлическое сопротивление, потребляемую мощность, годовое потребление электроэнергии, износ катализатора и сепарационных аппаратов. Очевидно, что по данным параметрам выгоднее себя показывает СУсДЭ. Годовое потребление электроэнергии СУсДЭ в 2,5 раза меньше, чем у циклонных сепараторов. При использовании 6 СУсДЭ относительно 12 циклонных сепараторов экономия может составить до 78 213 кВт·ч. В зависимости от тарифного норматива на электроэнергию может быть рассчитана денежная экономия. Более низкие скорости газопылевого потока в СУсДЭ относительно циклонных сепараторов позволяют продлить ресурс как катализатора, так и самого устройства (табл. 3).

В ходе экономической оценки внедрения 6 СУсДЭ в реакторах с псевдоожиженным слоем было установлено, что чистый дисконтированный доход NPV (рис. 3) составит до 18 091 тыс. руб. за их 10-й срок полезного использования при финансовых потоках в год CF с учетом амортизационных отчислений от 2500 до 5500 тыс. руб. и первоначальной стоимости проекта IC, равной 5726 тыс. руб. При этом дисконтированные денежные потоки DCF составили не менее 437 тыс. руб. на 10-й год. Расчет индекса доходности PI (рис. 4) при различной первоначальной стоимости проекта IC от 5726 до 15 000 тыс. руб. показал, что он является рентабельным, т.е.  $PI > 1$ , только в тех случаях, при которых финансовые потоки в год CF составляют не менее 1867 тыс. руб. В соответствии с выполнением условия  $PI > 1$  было установлено, что дисконтированный срок окупаемости проекта DPP (рис. 5) составляет бо-

Таблица 3

Технико-экономическое сравнение двух проектов

Показатели	6 сепарационных устройств с дугообразными элементами (СУсДЭ)	12 циклонных сепараторов
Стоимость проекта, тыс. руб.	5726	15 000
Эффективность, %	Высокая	Высокая
Гидравлическое сопротивление	Менее 3600 Па	Более 9000 Па
Потребляемая мощность $N$ , кВт	6,1	15,3
Годовое потребление электроэнергии $N_r$ , кВт·ч	52 143	130 356
Металлоемкость, кг	5119	7200
Износ катализатора при его улавливании	Низкий	Высокий
Износ аппаратов	Низкий	Высокий

лее 1,4 года при финансовых потоках в год CF до 5500 тыс. руб.

### Обсуждение

Чистый дисконтированный доход NPV проекта на протяжении установленного полезного использования СУсДЭ от 1 до 10 лет составил от -4062 до 3591, от -3200 до 8424, от -2338 до 13 258 и от -1476 до 18 091 тыс. руб. при финансовых потоках в год CF с учетом амортизационных отчислений 2500, 3500, 4500 и 5500 тыс. руб. соответственно. При этом чистый дисконтированный доход NPV возрастает до положительных значений на 5, 3, 2 и 2 год при финансовых потоках CF, равных 2500, 3500, 4500 и 5500 тыс. руб. соответственно (рис. 3).

В ходе расчетов были получены линейные зависимости индекса доходности PI проекта по внедрения 6 СУсДЭ в реакторах с псевдоожиженным слоем от финансовых потоков в год CF с учетом амортизационных отчислений. При первоначальной стоимости проекта IC, равной 5726, 7000, 10 000 и 15 000 тыс. руб., и условии, что индекс доходности PI = 1, финансовые потоки в год CF должны составлять 1866, 2133, 2986 и 4977 тыс. руб. соответственно.

Таким образом, для рентабельности проекта с экономической точки зрения финансовые потоки CF должны быть больше данных значений при соответствующей первоначальной стоимости IC. Индекс доходности PI составляет 1–4,4, 1–3,3, 1–2,1 и 1–1,2 при финансовом потоке в год CF, равном 1866–5500 (IC = 5726 тыс. руб.), 2133–5500 (IC = 7000 тыс. руб.), 2986–5500 (IC = 10 000 тыс. руб.) и 4977–5500 тыс. руб. (IC = 15 000 тыс. руб.) соответственно (рис. 4).

Степенные зависимости, представленные на рис. 5, дисконтированного срока окупаемости проекта DPP от финансовых потоков CF при различной первоначальной его стоимости IC позволили установить, что наиболее быстрая окупаемость проекта, соответствующая DPP, равному 1,4, 1,8, 3,1 и 6,3, достигается при IC, равной 5726, 7000, 10 000 и 15 000 тыс. руб. соответственно (при этом CF равен 5500 тыс. руб.). Очевидно, что снижение финансовых потоков в год CF приводит к повышению дисконтированного срока окупаемости проекта по внедрению СУсДЭ в реактор с псевдоожиженным слоем. Так, при CF, соответствующий PI = 1, равным 1866, 2133, 2986 и 4977 тыс. руб., дисконтированный срок окупаемости

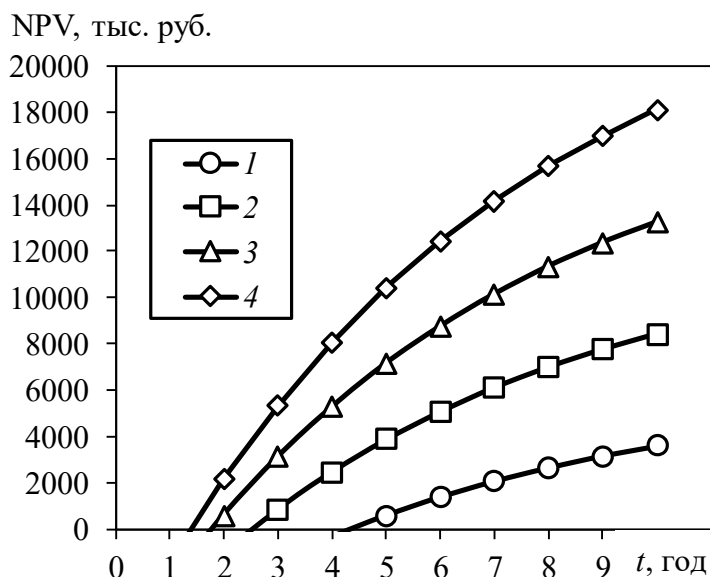


Рис. 3. Зависимость чистого дисконтированного дохода по годам при различных значениях финансовых потоков в год с учетом амортизационных отчислений CF, тыс. руб.: 1 – 2500; 2 – 3500; 3 – 4500; 4 – 5500.

Примечание – Первоначальная стоимость проекта IC составляет 5726 тыс. руб.

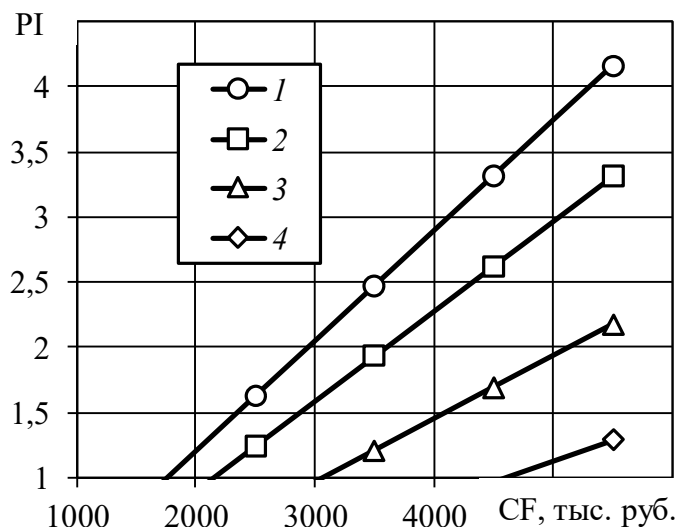


Рис. 4. Зависимость индекса доходности от финансовых потоков в год с учетом амортизационных отчислений при различных значениях первоначальной стоимости проекта IC, тыс. руб.: 1 - 5726; 2 - 7000; 3 - 10 000; 4 - 15 000

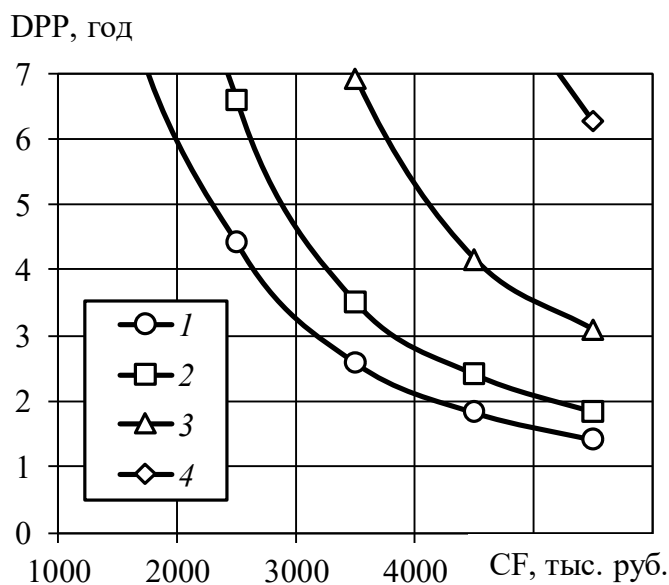


Рис. 5. Зависимость дисконтированного срока окупаемости от финансовых потоков с учетом амортизационных отчислений при различных значениях первоначальной стоимости проекта IC, тыс. руб.: 1 - 5726; 2 - 7000; 3 - 10 000; 4 - 15 000

DPP составляет 6,6 (IC = 5726 тыс. руб.), 8,1 (IC = 7000 тыс. руб.), 8,9 (IC = 10 000 тыс. руб.) и 9,9 (IC = 15 000 тыс. руб.) года соответственно (см. рис. 5).

#### Заключение

Технико-экономическое обоснование внедрения сепарационных устройств с дуго-

образными элементами (СУсДЭ) в реакторах с псевдооживленным слоем позволило установить, что относительно применяемых на данный момент времени циклонных сепараторов достигается сопоставимая эффективность, но первоначальная стоимость проекта, гидравлическое сопротивление, металлоемкость, энергетические затраты, эрозионный износ

материала и стенок аппарата существенно ниже.

Можно отметить, что проект является в большинстве случаев экономически целесообразным (при условии достижения индекса доходности  $PI > 1$ ).

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Стоимость проекта по внедрению 6 СУсДЭ в реакторах с псевдооживленным слоем оценивается в 5726 тыс. руб., что в 2,6 раза дешевле аналогов (12 циклонных сепараторов).

2. Большинство технических характеристик 6 СУсДЭ лучше, чем у 12 циклонных сепараторов: металлоемкость 5119 кг (в 1,4 раза

ниже), гидравлическое сопротивление около 3600 Па (в 2,5 раза ниже), износ катализатора и стенок аппарата ниже вследствие более низких рабочих скоростей.

3. Расчет индекса доходности  $PI$  при различной первоначальной стоимости проекта  $IC$  от 5726 до 15 000 тыс. руб. показал, что он является рентабельным, т.е.  $PI > 1$ , только в тех случаях, при которых финансовые потоки в год  $CF$  с учетом амортизационных отчислений составляют не менее 1867 тыс. руб.

4. Дисконтированный срок окупаемости проекта  $DPP$  составляет 1,4–6,6 лет при финансовых потоках в год  $CF$ , равных 1867–5500 тыс. руб. при первоначальной стоимости проекта  $IC$ , равной 5726 тыс. руб.

#### Список источников

1. Мистахов Р.И. Повышение эффективности организации производственных процессов на предприятии // Экономика и управление в машиностроении. 2013. № 1. С. 19–22.
2. Здоровец Ю.И., Петросов Д.А. Повышение экономической эффективности выращивания зернового производства на основе интеллектуального моделирования производственных процессов // Экономика и предпринимательство. 2019. № 5 (106). С. 840–844.
3. Лапаева О.Ф., Дедеева С.А. Внедрение и применение инновационных технологий в топливно-энергетическом комплексе в условиях импортозамещения // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 8 (183). С. 98–103.
4. Маренков Н.Л. Внедрение инновационных технологий: учет, анализ эффективности // Труд и социальные отношения. 2007. Т. 18, № 1. С. 132–137.
5. Плотников К.Б., Даниленко М.И. Экономическая оценка внедрения безотходных и энергосберегающих технологий на примере производства сухого молока // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-2. С. 4.
6. Салахутдинов И.Т. Экономическое обоснование оптимального решения проблемы выбора создания транспортного беспилотного летательного аппарата на различных стадиях жизненного цикла // Инновации и инвестиции. 2021. № 2. С. 100–106.
7. Техничко-экономическая оценка разработки устройства для профилактики апноэ во время физиологического сна у человека / С.Б. Казаков, Д.М. Шишов, А.И. Ларин, А.П. Николаев, А.В. Писарева // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. Т. 19, № 3. С. 198–210. doi:10.36622/VSTU.2020.19.3.025.
8. Кяримов Р.Р., Шапошников Н.Н., Митрянин А.В. Техничко-экономическое обоснование применения аддитивной технологии селективного лазерного сплавления на примере элементов космической техники из титана // Космическая техника и технологии. 2022. № 4 (39). С. 5–21.
9. Техничко-экономическое обоснование применения мультивихревого классификатора-сепаратора / В.Э. Зинуров, А.Р. Галимова, И.Г. Ахметова, И.Н. Мадышев // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2022. № 7. С. 33–44. doi:10.46554/1993-0453-2022-7-213-33-44.
10. Дударев В.В., Сухоцкий А.Б. Техничко-экономическое обоснование выбора профиля сетчато-точечной пластины теплообменного аппарата // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. 3, Химия и технология неорганических веществ. 2008. Т. 1, № 3. С. 118–121.
11. Пылеулавливающее устройство для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с кипящим слоем катализатора / Э.И. Салахова, А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, И.Р. Набиуллин, И.И. Салахов // Катализ в промышленности. 2022. Т. 22, № 2. С. 57–64. doi:10.18412/1816-0387-2022-2-57-64.
12. Сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.А. Абдулина // Известия выс-

ших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 3. С. 117–127. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-117-127.

13. Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э.И. Салахова, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриева, А.А. Абдуллина // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26, № 8. С. 41–46. doi:10.55421/1998-7072\_2023\_26\_8\_41.

14. Салахова Э.И., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э. Исследование структуры газового потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25, № 5. С. 60–64. doi:10.55421/1998-7072\_2022\_25\_5\_60.

15. Манжилевская С.Е., Дарсигов М.Д., Кравченко Е.С. Техничко-экономическое обоснование выбора пылеулавливающего оборудования в проектных решениях реконструкции зданий // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2. С. 233–244.

16. Сергеева А.В., Мелай Е.А., Никитина Е.А. Методика сравнительного анализа инвестиционной привлекательности организаций // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2022. № 2. С. 127–133.

17. Яковлева Е.В., Ильина Е.В. Экономическая динамика промышленных предприятий в условиях цифровизации // Омский научный вестник. Серия: Общество. История. Современность. 2021. № 3. С. 114–120.

### References

1. Mistakhov R.I. Improving the efficiency of the organization of production processes at the enterprise // Economics and management in mechanical engineering. 2013. No. 1. Pp. 19–22.

2. Zdorovets Yu.I., Petrosov D.A. Improving the economic efficiency of growing grain production based on intelligent modeling of production processes // Economics and entrepreneurship. 2019. No. 5 (106). Pp. 840–844.

3. Lapaeva O.F., Dedeeva S.A. Introduction and application of innovative technologies in the fuel and energy complex in the context of import substitution // Bulletin of the Orenburg State University. 2015. No. 8 (183). Pp. 98–103.

4. Marenkov N.L. Introduction of innovative technologies: accounting, efficiency analysis // Labor and social relations. 2007. Vol. 18, No. 1. Pp. 132–37.

5. Plotnikov K.B., Danilenko M.I. Economic assessment of the introduction of waste-free and energy-saving technologies on the example of milk powder production // Modern problems of science and education. 2015. No. 1-2. P. 4.

6. Salakhutdinov I.T. Economic justification of the optimal solution to the problem of choosing the creation of a transport unmanned aerial vehicle at various stages of the life cycle // Innovations and investments. 2021. No. 2. Pp. 100–106.

7. Technical and economic assessment of the development of a device for the prevention of apnea during physiological sleep-in humans / S.B. Kazakov, D.M. Shishov, A.I. Larin, A.P. Nikolaev, A.V. Pisareva // System analysis and management in biomedical systems. 2020. Vol. 19, No. 3. Pp. 198–210. doi:10.36622/VSTU.2020.19.3.025.

8. Karimov R.R., Shaposhnikov N.N., Mitryanin A.V. Feasibility study of the application of additive technology of selective laser fusion on the example of elements of space technology made of titanium // Space technology and technologies. 2022. No. 4 (39). Pp. 5–21.

9. Feasibility study of the use of a multivirve classifier-separator / V.E. Zinurov, A.R. Galimova, I.G. Akhmetova, I.N. Madyshev // Vestnik of Samara State University of Economics. 2022. No. 7. Pp. 33–44. doi:10.46554/1993-0453-2022-7-213-33-44.

10. Dudarev V.V., Sukhotsky A.B. Feasibility study of the choice of the profile of the mesh-flow plate of the heat exchanger // Proceedings of the Belarusian State Technological University. Ser. 3, Chemistry and technology of inorganic substances. 2008. Vol. 1, No. 3. Pp. 118–121.

11. Dust-collecting device for dehydrogenation blocks of paraffin hydrocarbons with a boiling catalyst layer / E.I. Salakhova, A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, I.R. Nabiullin, I.I. Salakhov // Catalysis in industry. 2022. Vol. 22, No. 2. Pp. 57–64. doi:10.18412/1816-0387-2022-2-57-64.

12. Comparison of technical characteristics of a multi-vortex separator with cyclones of various modifications / V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, R.Ya. Bikkulov, O.S. Dmitrieva, A.A. Abdullina // News of higher educa-

tional institutions. Energy problems. 2023. Vol. 25, No. 3. Pp. 117–127. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-117-127.

13. The effect of separation grating on the efficiency of solid particle capture in a device with arc-shaped elements / E.I. Salakhova, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitrieva, A.A. Abdullina // Bulletin of the Technological University. 2023. Vol. 26, No. 8. Pp. 41–46. doi:10.55421/1998-7072\_2023\_26\_8\_41.

14. Salakhova E.I., Dmitriev A.V., Zinurov V.E. Investigation of the gas flow structure in a separation device with arc-shaped elements // Bulletin of the Technological University. 2022. Vol. 25, No. 5. Pp. 60–64. doi:10.55421/1998-7072\_2022\_25\_5\_60.

15. Manzhilevskaya S.E., Darsigov M.D., Kravchenko E.S. Feasibility study of the choice of dust-collecting equipment in the design solutions for the reconstruction of buildings // Engineering Bulletin of the Don. 2021. No. 2. Pp. 233–244.

16. Sergeeva A.V., Melai E.A., Nikitina E.A. Methodology of comparative analysis of investment attractiveness of organizations // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser.: Economics. 2022. No. 2. Pp. 127–133.

17. Yakovleva E.V., Ilyina E.V. Economic dynamics of industrial enterprises in the conditions of digitalization // Omsk Scientific Bulletin. Ser.: Society. History. Modernity. 2021. No. 3. Pp. 114–120.

### **Информация об авторах**

*В.Э. Зинуров* – кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой «Инженерная графика» Казанского государственного энергетического университета;

*Э.И. Салахова* – старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» Нижнекамского химико-технологического института (филиала) Казанского национального исследовательского технологического университета;

*И.Н. Мадышев* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой машин и аппаратов химических производств Нижнекамского химико-технологического института (филиала) Казанского национального исследовательского технологического университета;

*А.А. Абдулина* – студент Казанского государственного энергетического университета.

### **Information about the authors**

*V.E. Zinurov* – Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Engineering Graphics of Kazan State Energy University;

*E.I. Salakhova* – Senior lecturer of the Department of "Processes and Devices of Chemical Technologies" of Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) Kazan National Research Technological University;

*I.N. Madyshev* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Machinery and Apparatus of Chemical Production of Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) Kazan National Research Technological University;

*A.A. Abdullina* – student of Kazan State Energy University.

Статья поступила в редакцию 29.11.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 16.01.2024.

The article was submitted 29.11.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 16.01.2024.