

Научная статья  
УДК 658.29:621.928.6  
doi:10.46554/1993-0453-2023-2-220-22-34

### Экономическая оценка целесообразности использования мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильных камерах

Вадим Эдуардович Зинуров<sup>1</sup>, Алсу Рузилевна Галимова<sup>2</sup>, Рустем Ядкарович Биккулов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

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

<sup>2</sup> galimovaar00@mail.ru

<sup>3</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия,  
samasaka@yandex.ru

**Аннотация.** В статье проведена экономическая оценка целесообразности внедрения мультивихревых сепараторов, предназначенных для увеличения эксплуатационного срока службы фильтров тонкой очистки, в технологическую линию предприятия с окрасочно-сушильными камерами. Показано, что быстрый износ фильтров тонкой очистки приводит к необходимости их частой замены. В результате отмечаются существенные экономические издержки. Для увеличения срока службы фильтров предложены мультивихревые сепараторы, описан принцип их действия. Проведен экономический расчет для 3 вариантов интегрирования мультивихревых сепараторов в технологическую линию: 1) перед потолочными фильтрами; 2) перед напольными фильтрами; 3) перед потолочными и напольными фильтрами. Рассчитаны такие параметры, как денежный поток, дисконтированный срок окупаемости, чистый дисконтированный доход и индекс доходности. Результаты показали, что проект по внедрению мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильную камеру является рентабельным при их эффективности более 0,4, так как индекс доходности PI составляет более 1. Чистый дисконтированный доход проекта NPV при эффективности мультивихревых сепараторов от 0,4 до 0,8 составляет от 159,6 до 749,12 тыс. руб., от 976,1 до 2417,4 тыс. руб. и от 1135,7 до 3166,5 тыс. руб. при реализации проекта по 1-му, 2-му и 3-му варианту соответственно при сроке полезного использования сепаратора  $N = 10$  лет. Срок окупаемости проекта – от 12 месяцев. В качестве пилотного проекта может выступить первый вариант, т.е. размещение мультивихревых сепараторов перед потолочными фильтрами. Это объясняется минимальными инвестиционными затратами среди всех вариантов, составляющими 150 000 руб., и относительно быстрым дисконтированным сроком окупаемости проекта, составляющим от 12 до 39 мес. в зависимости от эффективности мультивихревых сепараторов.

**Ключевые слова:** экономическая эффективность, мультивихревой сепаратор, фильтр, расчет, срок окупаемости

#### Основные положения:

- ♦ проведена экономическая оценка целесообразности внедрения мультивихревого сепаратора, предназначенного для улавливания мелкодисперсных частиц из воздуха размером до 10 мкм;
- ♦ проведены экономические расчеты для 3 различных вариантов интегрирования мультивихревых сепараторов в технологическую линию предприятия;
- ♦ рассмотрено влияние эффективности мультивихревых сепараторов на изменение дисконтированного срока окупаемости проекта и индекса доходности в зависимости от их расположения.

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

**Для цитирования:** Зинуров В.Э., Галимова А.Р., Биккулов Р.Я. Экономическая оценка целесообразности использования мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильных камерах // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2023. № 2 (220). С. 22–34. doi:10.46554/1993-0453-2023-2-220-22-34.

Original article

## Economic evaluation of the rationality of using multivortex separators in painting and drying chambers

Vadim E. Zinurov<sup>1</sup>, Alsu R. Galimova<sup>2</sup>, Rustem Ya. Bikkulov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

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

<sup>2</sup> galimovaar00@mail.ru

<sup>3</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, samasaka@yandex.ru

**Abstract.** The article provides an economic assessment of the feasibility of application of multi-vortex separators designed to increase the operational life of fine filters in the technological line of an enterprise with paint-drying chambers. It is shown that the rapid wear of fine filters leads to the need for their frequent replacement. As a result, there are significant economic costs. To increase their service life, multi-vortex separators are proposed. The principle of their operation is described. An economic calculation has been carried out for 3 variants of integrating multi-vortex separators into the production line: 1) in front of ceiling filters; 2) in front of floor filters; 3) in front of ceiling and floor filters. In the work, such parameters as cash flow, discounted payback period, net discounted income and profitability index were calculated. The results showed that the project for the introduction of multi-vortex separators into the paint-drying chamber is cost-effective if their efficiency is more than 0.4, since the PI profitability index is more than 1. The net discounted income of the NPV project with the efficiency of multi-vortex separators from 0.4 to 0.8 is from 159.6 to 749.12, from 976.1 to 2417.4 and from 1135.7 to 3166.5 thousand rubles, when implementing the project for options 1, 2 and 3, respectively, with the useful life of the separator  $N = 10$  years. The payback period of the project is from 12 months. As a pilot project, 1 option can act, i.e. the placement of multi-vortex separators in front of ceiling filters. This is due to the minimum investment costs among all options, amounting to 150,000 rubles and a relatively fast discounted payback period of the project, ranging from 12 to 39 months, depending on the effectiveness of multi-vortex separators.

**Keywords:** economic efficiency, multi-vortex separator, filter, calculation, payback period

### Highlights:

- ◆ an economic assessment was made of the feasibility of introducing a multi-vortex separator designed to capture fine particles from the air up to 10 microns in size;
- ◆ economic calculations were carried out for 3 different options for integrating multivortex separators into the production line of the enterprise;
- ◆ the influence of the efficiency of multi-vortex separators on the change in the discounted payback period of the project and the profitability index depending on their location are considered.

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

**For citation:** Zinurov V.E., Galimova A.R., Bikkulov R.Ya. Economic evaluation of the rationality of using multivortex separators in painting and drying chambers // Vestnik of Samara State University of Economics. 2023. No. 2 (220). Pp. 22–34. (In Russ.). doi:10.46554/1993-0453-2023-2-220-22-34.

### Введение

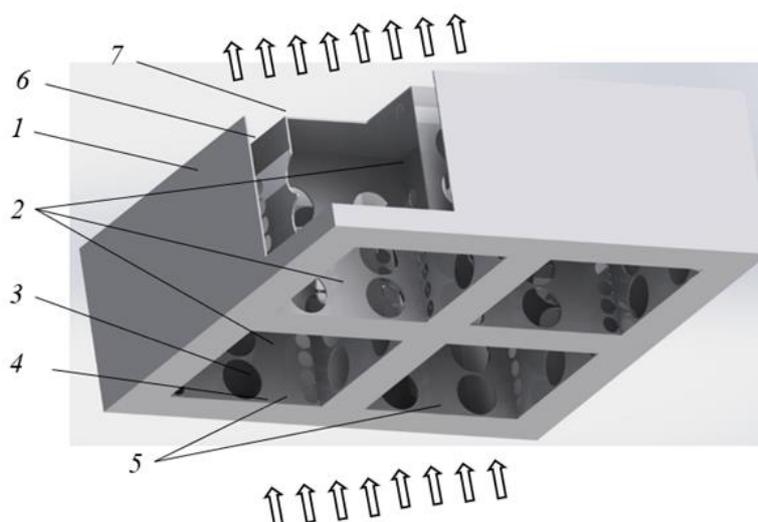
Одной из первостепенных задач в промышленном секторе является модернизация оборудования, т.е. замена действующего оборудования на более инновационные с технической точки зрения аналоги или внесение детальных изменений в уже функционирующую технологическую линию предприятия.

Стоимость нового оборудования в ряде случаев может оказаться достаточно высокой, что ставит под сомнение эффективность реализации процесса его внедрения. Таким образом, данная проблема является актуальной и требует детального технико-экономического обоснования. Важность технико-экономического расчета при модернизации технического оборудования заключается в правильном распределении капитальных вложений предприятия и иных имеющихся ресурсов [1].

Так, в деятельности промышленных предприятий, связанной с использованием окрасочно-сушильных камер, применяются различного рода состава суспензии – лакокрасочные покрытия в целях получения глянцевых и матовых покрытий продукции. Однако в ходе производственного этапа химические вещества распыляются в процессе окраски и наблюдается выделение взвешенных частиц и летучих соединений, имеющих высокую степень токсичности. Анализируя производственный процесс покраски, важно проводить мероприятия по снижению воздействия опасных и вредных производственных факторов для обеспечения безопасных условий труда и минимизации негативного влияния на окружающую среду [2; 3]. Помимо обязательных средств индивидуальной защиты обслуживающего технического персонала в помещениях устанавливают фильтры тонкой очистки, вентиляционные установки и воздухораспределительные пленумы с фильтрами твердой очистки. Перечисленные фильтрующие элементы на протяжении всего технологического цикла окраски и сушки позволяют эффективно очищать запыленный поток воздуха от взвешенных мелкодисперсных твердых частиц. Как правило, их размер составляет до 10 мкм. Однако с экономической точки зрения данные фильтры являются дорогостоящими и трудно окупаемыми, а с экологической – имеют продолжительный период раз-

ложения после их эксплуатации. Практически все фильтры выпускаются за рубежом, вследствие чего существуют политические риски. Ввиду повышенных требований к воздуху в окрасочно-сушильных камерах фильтры достаточно часто заменяют, что приводит к остановке производственного процесса. В результате возникают дополнительные экономические издержки. Вследствие этого актуальной задачей является увеличение эксплуатационного срока службы фильтров тонкой очистки в окрасочно-сушильных камерах [4].

Авторами работы в качестве решения данной задачи был предложен мультивихревой сепаратор (рис. 1), предназначенный для улавливания мелкодисперсных частиц из воздуха размером до 10 мкм [5]. Принцип действия устройства можно описать следующим образом: поток воздуха, содержащий мелкодисперсные частицы, входит в мультивихревой сепаратор через отверстия 3 и попадает в элементы квадратной формы 2, в стенках которых проделаны большие 3 и малые угловые 4 отверстия. При этом с обратной стороны мультивихревого сепаратора между элементами квадратной формы 2 проделаны глухие отверстия, образующие сепарационную зону 6 устройства. Большие отверстия 3 в элементах квадратной формы 2 геометрически расположены таким образом, что запыленный воздух при попадании в элементы 2, последующем распределении и прохождении через отверстия 3 образуют завихрения в каналах, т.е. в сепарационной зоне 6. Создаваемое количество завихрений вдвое больше отверстий 3. Иными словами, струя газа при выходе из каждого большого отверстия 3 по инерции делится на 2 основных потока, один из которых движется вправо, другой влево. При этом они закручиваются и постепенно перемещаются к выходу 7 из сепаратора. Отверстия 3, выполненные с определенным шагом и расположением относительно друг друга, позволяют создать множество завихрений в сепарационной зоне 6, которые «подпирают» друг друга. Особенностью устройства является то, что отверстия 3 проделаны таким образом, что у каждого вихря имеется своя область вращения и соседние вихри не пересекаются, что может привести к разрушению вихревой структуры. С



**Рис. 1. Мультивихревой сепаратор:**

1 – корпус; 2 – элементы квадратной формы; 3 – большие отверстия в элементах квадратной формы; 4 – малые угловые отверстия в элементах квадратной формы; 5 – входные отверстия в сепараторе; 6 – сепарационная зона; 7 – выход из сепарационной зоны сепаратора

учетом того, что радиус вихрей мал, при вращении воздуха с частицами создаются центробежные силы высоких значений, позволяющие их отбрасывать к стенкам мультивихревого устройства в сепарационной зоне 6. Вследствие производственных условий мелкодисперсные частицы при контакте со стенками прилипают к ним. Далее очищенный воздух выходит из мультивихревого сепаратора 7. Угловые отверстия 4 выполняют вспомогательную функцию – подпитку вихрей, которые создаются в углах мультивихревого сепаратора и подвержены саморазрушению вследствие конструктивных особенностей устройства. В ходе промышленных испытаний мультивихревого сепаратора в окрасочно-сушильной камере на предприятии ООО «КАМАТЕК» им была показана высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц из воздуха [6; 7]. Также было установлено, что частицы на стенках постепенно агломерируются (укрупняются) и комками падают вниз, которые уже не уносятся потоком воздуха. Очистку мультивихревого сепаратора предлагается осуществлять при замене основных фильтров механическим способом [8].

Целью данной работы является проведение экономической оценки целесообразности использования мультивихревых сепараторов в

окрасочно-сушильных камерах для увеличения эксплуатационного срока службы фильтров.

На экономический эффект и, соответственно, на срок службы фильтров будет влиять расположение мультивихревых сепараторов. Упрощенная схема окрасочно-сушильной камеры на предприятии ООО «КАМАТЕК» представлена на рис. 2. Следует отметить, что она работает в двух режимах: сперва осуществляется окраска изделий, затем их сушка. Основными элементами камеры являются вентиляторы 4 и 5, осуществляющие циркуляцию воздуха, устройства грубой очистки воздуха 7 для удаления из газа средних и крупных частиц, нагреватель воздуха 6, который включается при сушке деталей для ускорения данного процесса, рабочую зону для окраски изделий 1, потолочные 2 и напольные 3 фильтры. В ходе окраски изделий осуществляется непрерывная подача воздуха из атмосферы. При сушке изделий, как правило, заслонка, регулирующая подачу воздуха из окружающей среды, практически полностью закрывается и воздух, нагреваемый устройством 6, циркулирует в камере. Учитывая, что аэрозоль из рабочей зоны 1 сперва проходит через напольные фильтры 3, соответственно, они забиваются быстрее, чем потолочные фильтры 2. Вслед-

ствии этого замена напольных фильтров 3 осуществляется 5 раз в месяц, а потолочных 2 – один раз в месяц. Необходимо отметить, что в зависимости от конструкции окрасочно-сушильной камеры и марки используемых фильтров данные цифры могут изменяться.

Для увеличения эксплуатационного срока службы фильтров предлагается рассмотреть три варианта расположения мультивихревых сепараторов:

1) позиция 9 – непосредственно перед потолочными фильтрами 3;

2) позиция 8 – перед напольными фильтрами 2;

3) применение двух позиций 8 и 9 совместно.

В случае реализации 1-го и 2-го вариантов основной эффект увеличения эксплуатационного срока службы будет отнесен к фильтру 2 и 3 соответственно (см. рис. 2). Очевидно, что срок службы фильтров, перед которыми не установлены мультивихревые сепараторы (в зависимости от варианта 1 или 2), тоже увеличится, но в меньшей степени относительно

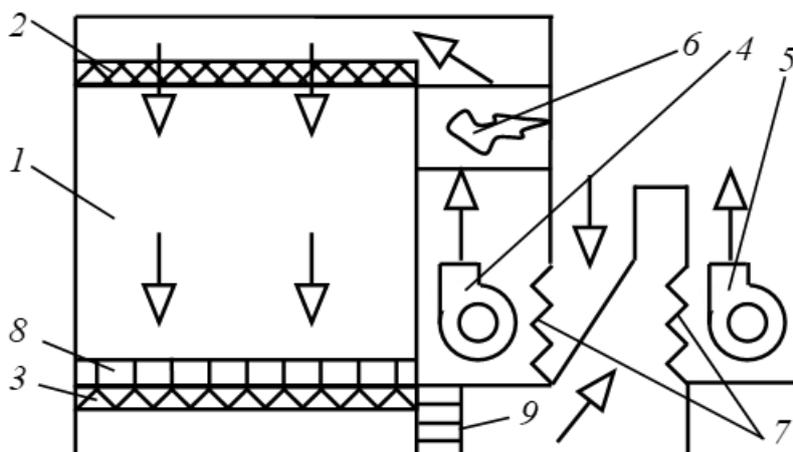


Рис. 2. Схема окрасочно-сушильной камеры:

- 1 – рабочая зона для окраски изделий; 2 – потолочные фильтры тонкой очистки; 3 – напольные фильтры; 4, 5 – вентиляторы; 6 – нагреватель воздуха при сушке; 7 – устройства грубой очистки воздуха; 8, 9 – предлагаемое расположение мультивихревых сепараторов

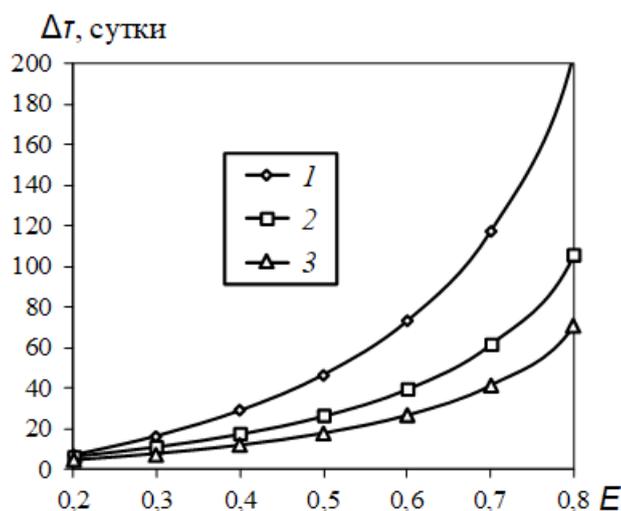


Рис. 3. Зависимость увеличения времени работы фильтра от эффективности работы мультивихревого сепаратора при различной концентрации частиц в воздухе  $c_0$ ,  $\text{кг/м}^3$ : 1 –  $5 \cdot 10^{-6}$ ; 2 –  $10 \cdot 10^{-6}$ ; 3 –  $15 \cdot 10^{-6}$

фильтров, перед которыми они установлены. Оценить эффект увеличения срока службы фильтров, перед которыми не установлены мультивихревые сепараторы, затруднительно. Вследствие этого при экономических расчетах было введено упрощение: увеличение эксплуатационного срока службы фильтров прогнозировалось только при непосредственном расположении мультивихревых сепараторов перед ними [9–10]. В случае реализации варианта 3 прогнозировалось увеличение продолжительности времени работы как напольных, так и потолочных фильтров (см. рис. 2).

При экономической оценке целесообразности применения мультивихревых сепараторов для увеличения срока службы фильтров одним из ключевых параметров является их эффективность [11]. По ранее проведенным исследованиям (рис. 3) были получены зависимости, позволяющие прогнозировать увеличение срока службы фильтров от эффективности сепараторов при различной концентрации частиц в воздухе. Для оценочных экономических расчетов принимался наихудший вариант увеличения продолжительности работы фильтров, который графически описывается линией 3 на рис. 3 при концентрации частиц в воздухе  $15 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>. За базовое значение эффективности  $E$  мультивихревого сепаратора принималось среднее значение – 0,5, чтобы учесть различные возможные факторы, снижающие эффективность: размер частиц менее 1 мкм, возврат частиц в газовый поток при их срыве со стенок сепаратора и др., которые могут возникнуть в ходе промышленного применения устройства [12–14]. При данной расчетной эффективности и концентрации частиц в воздухе прогнозируемое увеличение времени работы фильтра  $\Delta t$  составляет 18 суток (см. рис. 3).

### Методы

На предприятии ООО «КАМАТЕК» в окрасочно-сушильной камере стоимость замены (С, руб.) потолочных (1 раз в месяц) и напольных (5 раз в месяц) фильтров составляет 22 278,69 и 86 929,8 руб. в месяц соответственно. Экономия денежных средств, т.е. денежные потоки CF от внедрения мультивихревых сепараторов, будет рассчитываться на основе уменьшения количества замен фильтров

на новые и издержек, возникающих в результате остановки предприятий. Учитывая, что оценить финансовые потери предприятия в связи с остановкой работы окрасочно-сушильной камеры затруднительно, данным параметром в расчетах будем пренебрегать. Таким образом, общая формула, позволяющая рассчитать среднемесячные денежные потоки CF (руб./мес.) от внедрения мультивихревого сепаратора в окрасочно-сушильной камере, с учетом расчетной зависимости увеличения времени работы фильтров от эффективности устройства (см. рис. 3) может быть записана следующим образом:

$$CF = \frac{C}{12} \left( n - \frac{365}{n_y + \Delta t} \right), \quad (1)$$

где  $n$  – количество замен фильтров на новые в год согласно требованиям (потолочные фильтры – 12; напольные фильтры – 60);  $n_y$  – продолжительность работы фильтров, дн. (потолочные фильтры – 30; напольные фильтры – 6);  $\Delta t$  – временной интервал, на который увеличивается эксплуатационный срок службы фильтров, сутки (см. рис. 3).

Также необходимо рассмотреть основные затраты, влияющие на интегрирование мультивихревого сепаратора в окрасочно-сушильные камеры. Их совокупность можно определить по формуле:

$$K = K_{\text{мат}} + K_{\text{н}} + K_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{мат}}$  – материальные затраты, руб.;  $K_{\text{н}}$  – накладные расходы, руб.;  $K_{\text{пр}}$  – прочие расходы, руб.

Ранее было отмечено, что существует 3 варианта размещения мультивихревых сепараторов в камере. Размеры одного сепаратора составляют 200×200×80 мм (ширина×высота×глубина). Общая стоимость одного мультивихревого сепаратора – 25 000 руб. При размещении сепараторов перед потолочными фильтрами необходимо перекрыть сечение размерами 800×800 мм, т.е. нужно 4 шт. (1-й вариант). При размещении сепараторов перед напольными фильтрами необходимо перекрыть сечение размерами 7×4 м, т.е. нужно 128 шт. (2-й вариант). При реализации 3-го варианта необходимое количество сепараторов – 132 шт.

Рассмотрим экономический расчет в качестве примера для 2-го варианта. Определим

ежегодную сумму амортизации  $A_{\text{год}}$  по следующей формуле:

$$A_{\text{год}} = \frac{C_n H_a}{100\%}, \quad (3)$$

где  $C_n$  – первоначальная стоимость устройства, руб.;  $H_a$  – норма амортизации, %.

При этом норма амортизации рассчитывается по следующему выражению:

$$H_a = \frac{1}{N} 100\%, \quad (4)$$

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

Примем срок полезного использования устройства – 10 лет. Тогда годовую амортизацию можно представить в виде табл. 1.

Как отмечалось ранее, при 1-м варианте планируется установка 4 устройств. В таком случае общая сумма материальных затрат составит 100 000 руб. Накладные расходы принимаются как 40% от материальных затрат и составляют 40 000 руб. Прочие расходы, как правило, равняются около 10–20% от материальных затрат проекта. К ним относят расходы, которые не вошли в ранее составленную смету [15]. Зачастую большая часть прочих расходов относится к незапланированным затратам. Примем, что прочие расходы будут составлять  $K_{\text{пр}} = 10\ 000$  руб. Таким образом, итоговая

сумма затрат на реализацию мероприятия по внедрению мультивихревых сепараторов по формуле (2) будет составлять  $K = 150\ 000$  руб.

Расчет коэффициента дисконтирования  $K_d$  определялся по следующей формуле:

$$K_d = \frac{1}{(1+r)^t}. \quad (5)$$

В соответствии с приведенными данными примем в расчетах ставку дисконтирования равной 16%, т.е.  $r = 0,16$ . Для приведения стоимости ожидаемых денежных платежей к текущему моменту времени производят дисконтирование денежных потоков, которое вычисляется по следующему выражению:

$$DCF = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}. \quad (6)$$

где  $CF_t$  – финансовые потоки в год, руб.

Расчет показателя ЧДД (NPV) производится по формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - |IC|, \quad (7)$$

где  $IC$  – первоначальные затраты (инвестиции), т.е. планируемые вложения в реализацию проекта, руб.

Индекс доходности  $PI$  с учетом фактора времени, характеризующий эффективность инвестиций, вычисляется по формуле:

$$PI = \frac{NPV}{IC} + 1. \quad (8)$$

Таблица 1

Начисление годовой амортизации линейным способом

Срок полезного использования, год	Остаточная стоимость на начало года, руб.	Норма амортизации, %	Сумма годовых амортизационных отчислений, руб.	Балансовая стоимость, руб.
1	25 000	10	2500	22 500
2	22 500	10	2500	20 000
3	20 000	10	2500	17 500
4	17 500	10	2500	15 000
5	15 000	10	2500	12 500
6	12 500	10	2500	10 000
7	10 000	10	2500	7500
8	7500	10	2500	5000
9	5000	10	2500	2500
10	2500	10	2500	0

Таблица 2

Данные экономических показателей эффективности проекта с учетом дисконтирования

№ п/п	Стоимость, тыс. руб.	NPV, тыс. руб.	PI	DPP, мес.
Вариант 1	150	323,352	3,16	23
Вариант 2	2000	1584,624	1,79	46
Вариант 3	2150	1907,98	1,88	43

Дисконтированный срок окупаемости DPP проекта по интеграции мультивихревых сепараторов в технологическую линию предприятия рассчитывался по следующему выражению:

$$DPP = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq IC. \quad (9)$$

Аналогично расчет по формулам (2)–(9) будет осуществляться для 2-го и 3-го вариантов. Тогда значения чистого дисконтированного дохода ЧДД (NPV), индекса доходности PI и дисконтированного срока окупаемости DPP при эффективности мультивихревого сепаратора  $E = 0,5$  и  $\Delta t = 18$  суток (см. рис. 3) для трех вариантов можно представить в виде табл. 2.

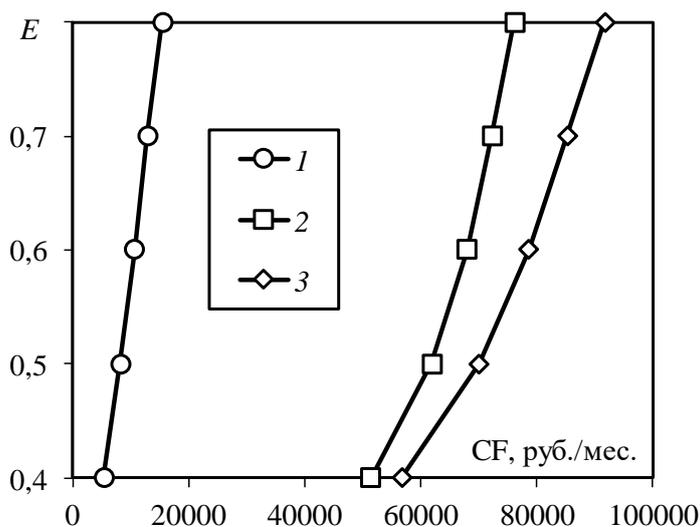
### Результаты

Результаты расчетов показали, что при более высокой эффективности мультивихревых сепараторов увеличиваются среднемесячные денежные потоки CF, составляющие от 5337,9 до 91 665,8 руб./мес. (рис. 4). В частности, периодичность замен отработанных фильтров на новые уменьшается, что приводит к снижению экономических издержек предприятия. Разница между экономическими издержками до момента времени установки мультивихревых сепараторов перед фильтрами и после данного момента времени является денежным потоком от внедрения сепарационных устройств в окрасочно-сушильной камере. Также с более высокой эффективностью мультивихревых сепараторов увеличиваются такие показатели, как чистый дисконтированный доход NPV (рис. 5), дисконтированный срок окупаемости DPP (рис. 6) и индекс доходности PI (рис. 7). При этом было установлено, что с экономической точки зрения реализация проекта по внедрению мультивихревых сепараторов на предприятии является рентабельной при их эффективности, равной более 0,4. В силу того, что установленный срок полезного использования мультивихревых сепараторов составляет 10 лет, при эффективности, равной 0,3 и менее данного значения, проект является убыточным вне зависимости от варианта месторасположения установки сепараторов в окрасочно-сушильной камере. Индекс доходности PI составляет менее 1 (см. рис. 7). Рассмотрение проекта по внедрению мультивихревых

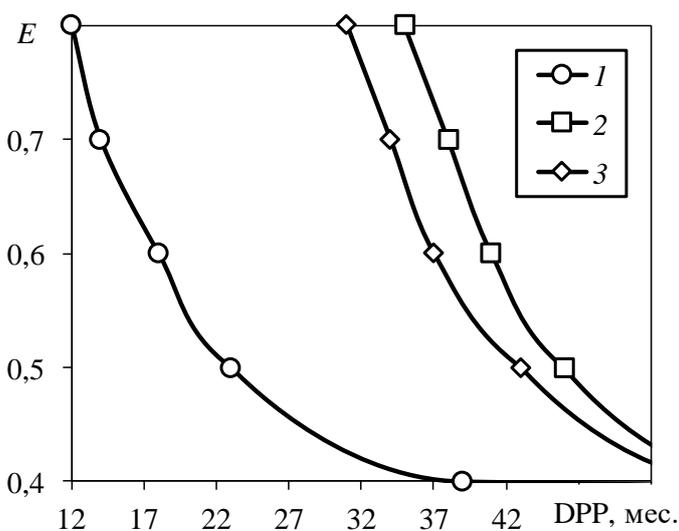
сепараторов в окрасочно-сушильной камере с точки зрения окупаемости и доходности существенно зависит, помимо эффективности сепараторов, от варианта их месторасположения в камере, первоначальных инвестиций и среднемесячных денежных потоков CF. Очевидно, что с потребностью использования большего количества мультивихревых сепараторов увеличиваются первоначальные инвестиции. Например, стоимость реализации 3-го варианта относительно 2-го варианта выше на 7,5% (см. табл. 1). При этом среднемесячные денежные потоки CF при реализации проекта по 3-му варианту относительно 2-го варианта (при эффективности сепаратора более 0,3) выше в среднем на 16%, значение дисконтированного срока окупаемости ниже в среднем на 8,3%, чистый дисконтированный доход NPV выше в среднем на 25,1%. Однако более высокие начальные инвестиции не всегда приводят к улучшенным показателям относительно меньших инвестиций. Так, при реализации данного проекта по 1-му варианту дисконтированный срок окупаемости ниже, чем для 2-го и 3-го вариантов в среднем в 1,99 раза. Наглядно это демонстрирует показатель, характеризующий окупаемость инвестиций – индекс доходности PI (см. табл. 1), который составляет для 1-го варианта 3,16, что больше на 1,37 и 1,28 относительно 2-го и 3-го вариантов соответственно. Таким образом, реализация проекта по внедрению мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильной камере при необходимости окупаемости в краткосрочной перспективе наиболее рентабельнее по 1-му варианту, в долгосрочной перспективе – по 3-му варианту.

### Обсуждение

Для оценки экономической эффективности был проведен анализ влияния эффективности работы предлагаемого оборудования на поступление будущих финансовых потоков, рассчитанных по формуле (1) для каждого отдельного случая (см. рис. 4). Очевидно, что рост эффективности влияет на увеличение среднемесячных денежных потоков интенсивнее при реализации проекта по 2-му и 3-му вариантам. Так, линия 1, характеризующая 1-й вариант, описывается линейной функцией.



**Рис. 4. Влияние эффективности мультивихревых сепараторов на среднемесячные денежные потоки в зависимости от их расположения:**  
 1 – позиция 9 – расположены непосредственно перед потолочными фильтрами 3;  
 2 – позиция 8 – расположены перед напольными фильтрами 2;  
 3 – позиции 8 и 9 совместно



**Рис. 5. Влияние эффективности мультивихревых сепараторов на изменение дисконтированного срока окупаемости проекта в зависимости от их расположения:**  
 1 – позиция 9 – расположены непосредственно перед потолочными фильтрами 3;  
 2 – позиция 8 – расположены перед напольными фильтрами 2;  
 3 – позиции 8 и 9 совместно

Линии 2 и 3 описываются степенными функциями. Важно отметить, что среднемесячные денежные потоки CF при эксплуатации мультивихревых сепараторов одновременно перед напольными и потолочными фильтрами (3-й вариант) имеют практически схожие полученные значения при использовании сепараторов только перед напольными фильтрами

(2-й вариант), так как в расчете применяются близкие по значению капитальные вложения, ставка дисконтирования и ожидаемые денежные поступления. Однако с ростом эффективности мультивихревых сепараторов реализация 3-го варианта относительно 2-го является более выгодной. Среднемесячные денежные потоки CF при эффективности мультивихревых

сепараторов от 0,4 до 0,8 составляют от 5337,9 до 15 502,4 руб./мес., от 51 312,1 до 76 163,4 руб./мес. и от 56 650,7 до 91 665,8 руб./мес. при реализации проекта по вариантам 1, 2 и 3 соответственно (см. рис. 4).

Улучшение конкурентоспособности и рентабельности внедрения определяет рассчитанная величина дисконтированного срока окупаемости проекта (см. рис. 5). Для промышленного сектора, в том числе предприятий химического комплекса, одной из главных задач является достижение быстрой окупаемости инновационной деятельности. Дисконтированный срок окупаемости проекта DPP при эффективности мультивихревых сепараторов от 0,4 до 0,8 составляет от 39 до 12 мес., от 60 до 35 мес. и от 58 до 31 мес. при реализации проекта по 1-му, 2-му и 3-му варианту соответственно (см. рис. 5).

На графике (рис. 6) отображены данные чистого дисконтированного дохода NPV для всех вариантов установки мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильной камере. При эффективности мультивихревых сепараторов от 0,4 до 0,8 чистый дисконтированный доход NPV составляет от 159,60 до 3166,5 тыс. руб. за срок полезного их использования  $N = 10$  лет. Положительные значения

NPV характеризуют оценку инвестиционной привлекательности проекта, обоснованности первоначальных капиталовложений и запланированного уровня доходности ежегодно. Как отмечалось выше, при эффективности мультивихревых сепараторов, равной 0,3 и ниже, проект за 10 лет не окупается. В частности, NPV, рассчитанный по формуле (7), при эффективности мультивихревых сепараторов  $E = 0,3$  составляет -86,1, -849,6 и -935,6 тыс. руб. при реализации 1-го, 2-го и 3-го варианта соответственно. Чистый дисконтированный доход проекта NPV при эффективности мультивихревых сепараторов от 0,4 до 0,8 составляет от 159,6 до 749,12 тыс. руб., от 976,1 до 2417,4 тыс. руб. и от 1135,7 до 3166,5 тыс. руб. при реализации проекта по 1-му, 2-му и 3-му варианту соответственно (см. рис. 6).

На рис. 7 представлено изменение индекса доходности PI, т.е. параметра, показывающего доход по отношению к исходным инвестициям. Если значение индекса доходности PI составляет 1, то проект должен быть подвергнут анализу по дополнительным показателям оценки эффективности. При PI менее 1 проект является убыточным и снимается с рассмотрения. По рис. 7 видно, что эффективность мультивихревых сепараторов должна составлять

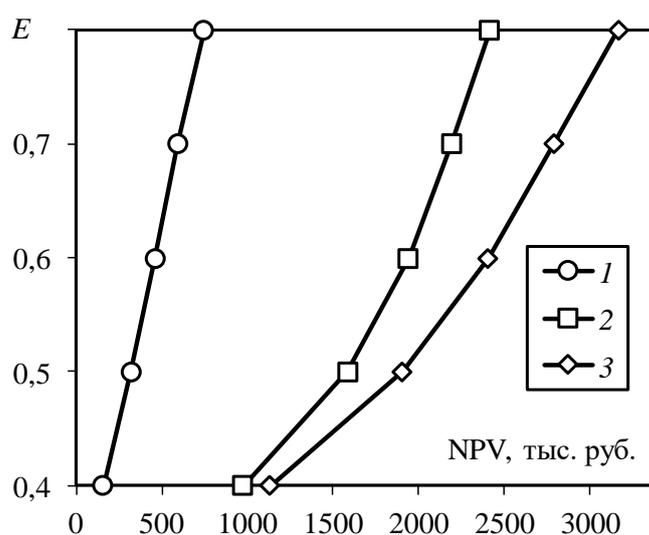


Рис. 6. Влияние эффективности мультивихревых сепараторов на изменение чистого дисконтированного дохода проекта в зависимости от их расположения:  
 1 – позиция 9 – расположены непосредственно перед потолочными фильтрами 3;  
 2 – позиция 8 – расположены перед напольными фильтрами 2;  
 3 – позиции 8 и 9 совместно

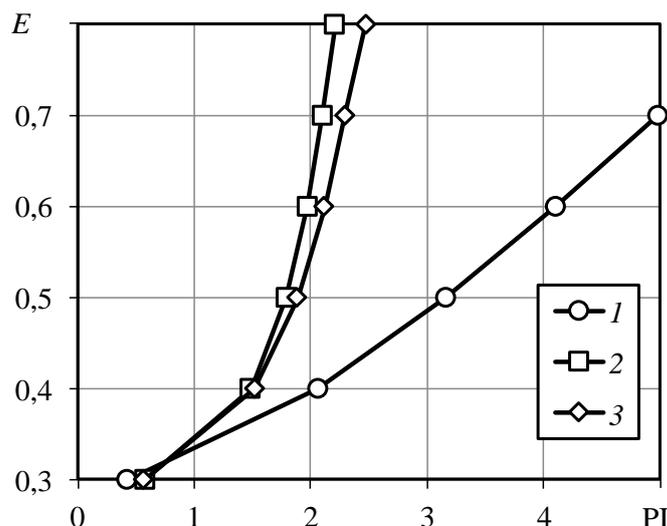


Рис. 7. Влияние эффективности мультивихревых сепараторов

на изменение индекса доходности в зависимости от их расположения:

- 1 – позиция 9 – расположены непосредственно перед потолочными фильтрами 3;  
2 – позиция 8 – расположены перед напольными фильтрами 2; 3 – позиции 8 и 9 совместно

более 0,4, так как необходимо иметь некоторый «запас». При этом критическое значение эффективности (число  $PI = 1$ ) соответствует 0,335, 0,345 и 0,345 при реализации проекта по 1-му, 2-му и 3-му варианту соответственно. Индекс доходности проекта  $PI$  при эффективности мультивихревых сепараторов от 0,3 до 0,8 составляет от 0,43 до 5,99, от 0,58 до 2,21 и от 0,57 до 2,47 при реализации проекта по варианту 1, 2 и 3 соответственно (см. рис. 7).

### Заключение

Таким образом, применение мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильных камерах в качестве устройств предварительной очистки перед напольными и потолочными фильтрами, увеличивающих эксплуатационный срок службы последних, с экономической точки зрения является рентабельным при условии, что эффективность сепараторов составляет более 0,4. Установлено, что в качестве пилотного проекта может выступить 1-й вариант, т.е. размещение мультивихревых сепараторов перед потолочными фильтрами. Это объясняется минимальными инвестиционными затратами среди всех вариантов, составляющими 150 000 руб., и относительно быстрым дисконтированным сроком окупаемости проекта – от 12 до 39 мес. в зависимости от эффективности мультивихревых сепараторов. Удачная реали-

зация проекта позволит дополнить, внести уточнения в экономический расчет 2-го и 3-го вариантов и перейти к реализации одного из них.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проект по внедрению мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильной камере является рентабельным при их эффективности более 0,4, так как индекс доходности  $PI$  составляет более 1.

2. Реализация проекта в краткосрочной перспективе наиболее целесообразна при установке мультивихревых сепараторов перед потолочными фильтрами (1-й вариант). Срок окупаемости составляет 23 мес. при эффективности сепараторов  $E = 0,5$ .

3. Реализация проекта в долгосрочной перспективе наиболее целесообразна при установке мультивихревых сепараторов перед напольными и потолочными фильтрами (3-й вариант). Срок окупаемости составляет 43 мес. при эффективности сепараторов  $E = 0,5$ .

4. Чистый дисконтированный доход проекта  $NPV$  при эффективности мультивихревых сепараторов от 0,4 до 0,8 составляет от 159,6 до 749,12 тыс. руб., от 976,1 до 2417,4 тыс. руб. и от 1135,7 до 3166,5 тыс. руб. при реализации проекта по 1-му, 2-му и 3-му варианту соответственно при сроке полезного использования сепаратора  $N = 10$  лет.

### Список источников

1. 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.
2. Шимохин А.В. Экономическое обоснование внедрения аддитивной технологии в технологические процессы производства продукции предприятия // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2019. № 4. С. 13–19.
3. Зинуров В.Э., Галимова А.Р. Оценка экономической эффективности внедрения сепарационных устройств на предприятиях с покрасочными камерами // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2020. № 12. С. 50–59. doi:10.46554/1993-0453-2020-12-194-50-59.
4. Calculation of efficiency of catching fine particles by a separation device with square channels / V.E. Zinurov, R.Y. Bikkulov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva // Chemical and petroleum engineering. 2023. Pp. 1–7. doi:10.1007/s10556-023-01128-1.
5. Применение сепарационных элементов квадратной формы в покрасочных камерах / Р.Я. Биккулов, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, Г.Р. Бадретдинова // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 11. С. 39–42.
6. Оценка эффективности мультивихревого сепаратора при улавливании мелкодисперсных частиц из газовых потоков в системе подготовки воздуха в окрасочных камерах / Р.Я. Биккулов, В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев [и др.] // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26, № 1. С. 38–43. doi:10.55421/1998-7072\_2023\_26\_1\_38.
7. Максютов Э.Р. Влияние модернизации оборудования на повышение конкурентоспособности предприятия // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика : материалы конференции. Казань, 2022. Т. 3. С. 267–269.
8. Оценка времени работы сепарационного устройства с элементами квадратной формы при очистке запыленного потока покрасочной камеры / Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев [и др.] // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25, № 1. С. 32–35.
9. Покшиванова О.П. Экономическая эффективность внедрения инновационного технологического оборудования // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 1. С. 249–254.
10. Нарядкина Н.А. Подход к расчету технико-экономической эффективности внедрения системы оперативного мониторинга качества рабочих и технологических сред энерготехнологического оборудования // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 15. С. 23–26.
11. Голофаст Т.И. Оценка влияния технологизации производства на обновляемость продукции // Вестник Омского университета. Серия: Экономика. 2018. № 3. С. 101–106.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Мерзликина Г.С. Эколого-экономическая эффективность деятельности промышленного предприятия: оценка и управление // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2019. № 3. С. 7–20.

### References

1. Feasibility study of the use of a multi-vortex 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.
2. Shimokhin A.V. Economic justification for the introduction of additive technology into the technological processes of the enterprise's production // Scientific journal of NIU ITMO. Series: Economics and Environmental Management. 2019. No. 4. Pp. 13–19.
3. Zinurov V.E., Galimova A.R. Evaluation of the economic efficiency of the introduction of separation devices at enterprises with paint chambers // Vestnik of Samara State University of Economics. 2020. No. 12. Pp. 50–59. doi:10.46554/1993-0453-2020-12-194-50-59.

4. Calculation of efficiency of catching fine particles by a separation device with square channels / V.E. Zinurov, R.Y. Bikkulov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva // Chemical and petroleum engineering. 2023. P. 1–7. doi:10.1007/s10556-023-01128-1.
5. Application of square-shaped separation elements in paint chambers / R.Y. Bikkulov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, G.R. Badretdinova // Vestnik of Technological University. 2021. Vol. 24, No. 11. Pp. 39–42.
6. Evaluation of the effectiveness of a multi-vortex separator when capturing fine particles from gas streams in the air preparation system in paint chambers / R.Y. Bikkulov, V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev [et al.] // Vestnik of Technological University. 2023. Vol. 26, No. 1. Pp. 38–43. doi:10.55421/1998-7072\_2023\_26\_1\_38.
7. Maksyutov E.R. The impact of equipment modernization on improving the competitiveness of the enterprise // XXV All-Russian postgraduate-master's scientific seminar dedicated to the Day of the power engineer : conference materials. Kazan, 2022. Vol. 3. Pp. 267–269.
8. Evaluation of the operating time of a separation device with square-shaped elements when cleaning the dusty flow of the paint chamber / R.Y. Bikkulov, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev [et al.] // Vestnik of Technological University. 2022. Vol. 25. No. 1. Pp. 32–35.
9. Pokshivanova O.P. Economic efficiency of the introduction of innovative technological equipment // Innovations. The science. Education. 2020. No. 1. Pp. 249–254.
10. Naryadkina N.A. Approach to the calculation of the technical and economic efficiency of the implementation of the system of operational monitoring of the quality of working and technological environments of energy-technological equipment // Problems of modern science and education. 2017. No. 15. Pp. 23–26.
11. Golofast T.I. Evaluation of the impact of technologization of production on the updatability of products // Vestnik of Omsk University. Series: Economics. 2018. No. 3. Pp. 101–106.
12. 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.
13. Yakovleva E.V., Ilyina E.V. Economic dynamics of industrial enterprises in the conditions of digitalization // Omsk Scientific Bulletin. Series: Society. History. Modernity. No. 3. Pp. 114–120.
14. Sergeeva A.V., Melai E.A., Nikitina E.A. Methodology of comparative analysis of investment attractiveness of organizations // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics. 2022. No. 2. Pp. 127–133.
15. Merzlikina G.S. Ecological and economic efficiency of an industrial enterprise: assessment and management // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics. 2019. No. 3. Pp. 7–20.

#### **Информация об авторах**

*В.Э. Зинуров* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета;  
*А.Р. Галимова* – магистрант Казанского государственного энергетического университета;  
*Р.Я. Биккулов* – инженер кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

#### **Information about the authors**

*V.E. Zinurov* – Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department "Theoretical Foundations of Heat Engineering" of Kazan State Power Engineering University;  
*A.R. Galimova* – master's student of Kazan State Power Engineering University;  
*R.Ya. Bikkulov* – engineer of the Department "Food Production Equipment" of Kazan National Research Technological University.

Статья поступила в редакцию 23.06.2023; одобрена после рецензирования 10.07.2023; принята к публикации 31.07.2023.

The article was submitted 23.06.2023; approved after reviewing 10.07.2023; accepted for publication 31.07.2023.