

ИНЕРЦИОННЫЙ СЕПАРАТОР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Абдуллина А.А.

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Научный руководитель: Шарипов И.И. – к.т.н., доцент кафедры ИГ

Аннотация. Рассмотрена проблема абразивного износа компрессоров газотурбинных установок из-за запыленности входного воздуха. Предложена конструкция инерционного сепаратора в качестве устройства предварительной очистки. Методом численного моделирования установлено, что при скоростях до 1 м/с эффективность улавливания частиц свыше 60 мкм достигает 96%. Внедрение устройства снижает риск аварий и повышает ресурс оборудования

Ключевые слова: промышленная безопасность, ГТУ, пылеулавливание, инерционный сепаратор, численное моделирование, абразивный износ, очистка воздуха, энергоэффективность

Введение. Газотурбинные установки занимают ключевое место в современной энергетике и промышленности, обеспечивая до 25–30% выработки электроэнергии [1]. Однако атмосферный воздух в промышленных зонах содержит значительное количество твёрдых абразивных частиц: кварцевая пыль, песок, зола, продукты коррозии металлов. Концентрация взвешенных частиц может достигать 50–100 мг/м³ в неблагоприятных условиях.

При попадании в проточную часть компрессора абразивные частицы вызывают эрозию рабочих лопаток, что приводит к снижению падению КПД установки и увеличению удельного расхода топлива. В критических случаях эрозия становится причиной вибрации, дисбаланса ротора и аварийной остановки энергоблока, что нарушает промышленную безопасность объекта и ведёт к значительным экономическим потерям [2]. Существующие системы воздухоочистки для ГТУ включают циклонные сепараторы, рукавные фильтры и фильтры тонкой очистки. Однако они имеют существенные недостатки: циклоны обладают высоким гидравлическим сопротивлением, что снижает мощность турбины; фильтры требуют частой замены и создают проблемы с утилизацией загрязнённых материалов. В контексте рационального природопользования и «зелёной» энергетики возникает потребность в энергоэффективных устройствах предварительной очистки с низким сопротивлением потоку.

В данной работе автором произведена оценка эффективности разработанного инерционного сепаратора для защиты входного тракта ГТУ от абразивных частиц в контексте повышения промышленной безопасности.

Основная часть. Предварительно была создана трехмерная модель устройства в программе КОМПАС-3D v23. Конструкция включает: входной патрубок прямоугольного сечения, корпус с пылесборным бункером, сепарационную решётку с V-образными элементами, расположенными в шахматном порядке навстречу к потоку, и выходной патрубок (рисунок 1). Принцип работы устройства следующий: запыленный газовый поток, проходя через сепарационные элементы, многократно искривляется, вследствие чего твёрдые частицы под действием инерционных и центробежных сил выбиваются из потока и отклоняются от линий тока газа. Отскочив от поверхности элементов, частицы попадают в застойные зоны с низкой скоростью и под действием гравитации осаждаются в пылесборный бункер, тогда как очищенный газ беспрепятственно выходит через выходной патрубок. А многопрофильная сепарационная решетка позволяет уменьшить эффект возвратных потоков, тем самым геометрия устройства оптимизирована для минимизации зон застоя и вторичных вихрей [3].

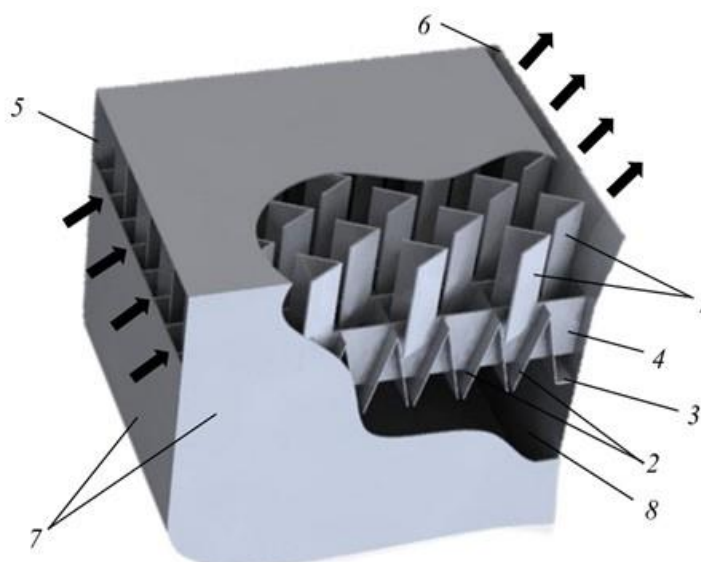


Рисунок 1 – Трехмерная модель устройства: 1 – сепарационные элементы; 2 – сепарирующая решетка; 3 – пластина; 4 – перпендикулярная пластина; 5 – входной патрубок; 6 – выходной патрубок; 7 – корпус; 8 – пылесборный бункер

Исследование проводилось методом вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS Fluent 2023 R1. Данный метод позволяет детально изучить структуру газового потока и траектории частиц без изготовления физического прототипа, что снижает затраты на исследование. На входе задавался профиль скорости от 0,5 до 5 м/с, на выходе – атмосферное давление, на боковых стенках – условие упругого отскока для частиц и прилипания на нижней части для имитации бункера. Также задавались следующие параметры частиц: плотность ρ 1000 кг/м³, диаметр от 10 до 200 мкм

В ходе серии вычислительных экспериментов получены зависимости фракционной эффективности улавливания от диаметра частиц при пяти различных скоростях входного потока w (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимость фракционной эффективности E при различной скорости входного потока w

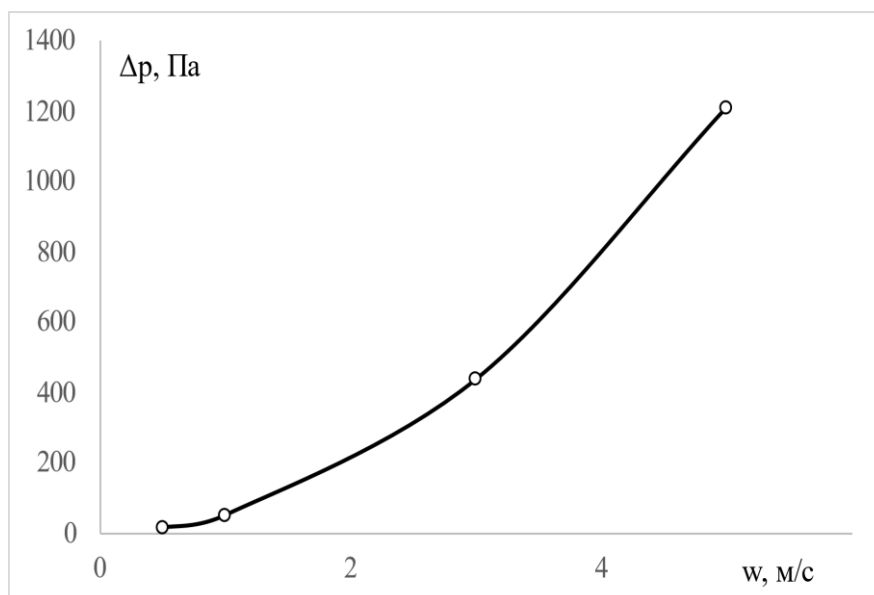
Диаметр частица a , мкм	Скорость входного потока w , м/с			
	0,5	1	3	5
	Фракционная эффективность E			
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
13	0,21	0	0	0
15	0,23	0	0	0
17	0,26	0,13	0	0
20	0,30	0,22	0	0
23	0,36	0,24	0	0
26	0,40	0,26	0	0
30	0,47	0,46	0,19	0
35	0,56	0,74	0,21	0
40	0,69	0,82	0,31	0,26
46	0,87	0,82	0,58	0,46
52	0,94	0,93	0,80	0,57

Продолжение таблицы 1

60	0,86	0,96	0,74	0,51
69	0,98	0,97	0,62	0,56
79	1	0,98	0,64	0,53
91	1	0,98	0,72	0,46
105	1	0,97	0,60	0,44
120	1	0,94	0,51	0,39
136	1	0,96	0,45	0,38
158	1	0,97	0,43	0,32
162	1	0,95	0,38	0,32
209	1	0,97	0,41	0,31

Анализ полученных значений показывает монотонный рост эффективности с увеличением диаметра частиц вследствие действия инерционных сил, выбивающих их из потока при огибании сепарационных элементов. Наибольшая эффективность достигается в диапазоне низких скоростей до 1 м/с: для частиц диаметром 40 мкм эффективность составляет 0,75, для 60 мкм – 0,9, для 79 мкм – 0,99. При увеличении входной скорости выше данного значения наблюдается резкое уменьшение эффективности, что связано с эффектом возврата частиц обратно в поток, так как после выбивания частицы из тока газа, при высоких скоростях она обладает достаточным значением импульса, позволяющим вернуться ей обратно в действующий поток. Данный эффект ограничивает применение устройства в высокоскоростных трактах пневмотранспорта, но не является препятствием для систем воздухозабора ГТУ, где скорости обычно не превышают 1–2 м/с.

Также было проведена оценка гидравлического сопротивления устройства при различных входных скоростях w (рисунок 2). В оптимальном режиме она не превышает 300 Па, что в 3–5 раз ниже показателей стандартных циклонов типа ЦН-15. Это критически важно для ГТУ, так как снижение сопротивления на входе позволяет сохранить мощность турбины и уменьшить расход топлива.


Рисунок 2 – График зависимости гидравлического сопротивления устройства Δp от скорости входного потока w

С точки зрения промышленной безопасности внедрение данной конструкции позволяет решить ряд критических задач. Снижение концентрации абразивных частиц на входе в компрессор способствует увеличению межремонтного периода оборудования на 20–30% за

счет уменьшения эрозионного износа лопаток. Кроме того, предотвращение неравномерного износа проточной части минимизирует риск возникновения дисбаланса ротора и внезапных аварийных остановок энергоблока. Низкое энергопотребление системы аспирации и возможность использования устройства в качестве первой ступени очистки также соответствуют принципам рационального природопользования и экологической безопасности предприятия [4].

Заключение. По итогам проведенного численного исследования подтверждена работоспособность разработанной модели инерционного сепаратора для условий эксплуатации газотурбинных установок. Установлено, что оптимальным режимом работы устройства является диапазон входных скоростей до 1 м/с, в котором аппарат обеспечивает высокую степень очистки воздушного потока от частиц размером более 40 мкм с эффективностью от 80%. При этом гидравлическое сопротивление не превышает 300 Па, что позволяет интегрировать сепаратор во входной тракт без существенной потери мощности турбины.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются изготовление физического прототипа для экспериментальной верификации расчетных данных, оптимизация геометрических параметров сепарационной решетки для расширения рабочего диапазона скоростей, а также экономическая оценка эффективности внедрения устройства на действующих энергообъектах ГТУ.

Исследование выполнено в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИШ», соглашение ИПИШ от 19.12.2025 г.

Список литературы

1. Методы очистки от угольной пыли уходящих газов на ТЭЦ / М. В. Маслובитов, Д. А. Козлов, Д. М. Булгаков, А. В. Рязанцева // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 73-3. – С. 104-109. – DOI 10.18411/ij-05-2021-111. – EDN BHWQZQ.
2. Способы очистки сопловых лопаток газотурбинного двигателя от оксидов металлов / Д. И. Логинова, Д. Д. Фомина, О. А. Федотова, В. З. Пойлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2023. – № 1. – С. 19-34. – DOI 10.15593/2224-9400/2023.1.02. – EDN CRVOLK.2
3. Сепарационное устройство с дугообразными элементами для улавливания частиц катализатора в реакторе с псевдоожиженным слоем / В. Э. Зинуров, Э. И. Салахова, А. В. Дмитриев [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 62-66. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_4_62. – EDN AVLDP.
4. Технично-экономическое обоснование внедрения сепарационных устройств с дугообразными элементами в реакторах с псевдоожиженным слоем / В. Э. Зинуров, Э. И. Салахова, И. Н. Мадыев, А. А. Абдуллина // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2023. – № 12(230). – С. 36-49. – DOI 10.46554/1993-0453-2023-12-230-36-49. – EDN IJLPLT.

UDC 621.438:621.928

INERTIAL SEPARATOR FOR IMPROVING INDUSTRIAL SAFETY OF GAS-TURBINE INSTALLATIONS

Abdullina A.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Sharipov I.I. – Cand. of Sci., associate professor of the department of IG

Annotation. The problem of abrasive wear of gas turbine compressors due to dustiness of the inlet air is considered. The design of an inertial separator as a pre-treatment device is proposed. By numerical modeling, it is established that at speeds up to 1 m/s, the efficiency of capturing particles over 60 μm reaches 96%. The device implementation reduces the risk of accidents and increases the equipment resource.

Keywords: industrial safety, GTE, dust collection, inertial separator, numerical modeling, abrasive wear, air purification, energy efficiency