

УДК 621.515.1

Проблема эрозионного износа в турбомашинах

В.Е. Ибрагимов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

The problem of erosive wear in turbomachinery

V.E. Ibragimov

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрено влияние эрозионного изнашивания на детали и узлы проточной части турбомшины, в частности центробежных компрессоров на газодожимных станциях. Установлено, что наибольшее влияние эрозия оказывает на рабочие колеса центробежного компрессора. Определено, что постепенное изнашивание рабочих колес приводит к ухудшению характеристик компрессора, а также к снижению долговечности и надежности системы в целом. Дан обзор развития математических моделей процесса эрозионного изнашивания, приведены основные зависимости. Рассмотрены публикации на тему эрозионного изнашивания турбокомпрессоров. Предложена методика моделирования эрозионного изнашивания проточной части центробежного компрессора. Исследованы рабочие колеса центробежных компрессоров, подверженных эрозионному износу. По полученным результатам выявлены зоны наибольшего повреждения эрозионными частицами стенок лопаток рабочих колес. Показано, для правильной оценки ресурса и надежности центробежного компрессора необходимо учитывать влияние эрозии механическими частицами на рабочие колеса.

EDN: VSBANF, <https://elibrary/vsbanf>**Ключевые слова:** центробежный компрессор, турбомашина, эрозия лопаток, математическая модель эрозии, моделирование эрозионного изнашивания

The problems of the influence of erosive wear during the operation of turbomachines are considered, in particular centrifugal compressors at gas booster stations, where erosive wear of components and assemblies of the flow path is encountered. It has been revealed that erosion has a particularly significant effect on impellers. It has been determined that the gradual wear of impellers leads to a deterioration of compressor performance and also affects the durability and reliability of the entire system as a whole, which makes the study of the erosion process especially relevant. A review of the development of mathematical models of the erosive wear process is carried out, and the main dependencies are presented. In addition, a review of publications on the topic of erosive wear of turbochargers is performed. The sequence of modeling erosive wear in turbomachines is presented, and the impellers of centrifugal compressors subjected to erosive wear are investigated. The obtained results made it possible to identify the zones of the most severe damage to the impeller blade walls caused by erosive particles. Conclusions are drawn on the necessity of taking into account the influence of erosion by mechanical particles on the impellers of centrifugal compressors for a correct assessment of service life and reliability.

EDN: VSBANF, <https://elibrary/vsbanf>**Keywords:** centrifugal compressor, turbomachinery, blade erosion wear, erosion mathematical model, gas-dynamic modeling erosive wear

Турбомашины — газотурбинные двигатели, центробежные (ЦК) и осевые компрессоры, вентиляторы, паровые и газовые турбины — являются основным звеном технологических систем таких отраслей, как авиация, энергетика, судостроение и нефтегазовая промышленность. От надежности и эффективности турбомашины зависят экономические и эксплуатационные характеристики всей системы.

При эксплуатации проточная часть турбомашины подвержена интенсивным воздействиям, приводящим к деградации, изнашиванию и выходу из строя. К таким воздействиям относится эрозия — механическое разрушение поверхности материала вследствие многократного столкновения твердых частиц, находящихся в рабочей среде (РС), со стенками проточной части. Твердые частицы (песок, пыль, продукты коррозии материала трубопровода и продукты сгорания) захватываются потоком РС и с большой скоростью сталкиваются с поверхностями лопаток, дисков и корпуса.

Проблема эрозионного изнашивания актуальна для ЦК, предназначенных для транспортирования сильно загрязненных сред. В газовой промышленности Российской Федерации, в частности магистральных газопроводах, с эрозионным изнашиванием сталкиваются на газодожимных станциях. Это связано с тем, что ЦК, сжимая природный газ для транспортирования, повышает давление и скорость течения потока, что при наличии механических примесей приводит к интенсивному ударно-абразивному износу проточной части.

Требования к содержанию твердых частиц в потоке природного газа, транспортируемого по трубопроводам, прописаны в СТО Газпром 2-3.5-138-2007, где отмечено, что их содержание не должно превышать 3 мг/м^3 , а доля частиц размером более 20 мкм — $0,15 \text{ мг/м}$ [1].

Цель работы — анализ существующих математических моделей эрозионного износа и рассмотрение особенностей его проявления в турбомашинах на примере реального рабочего колеса (РК) ЦК.

Эрозия в ЦК приводит не только к прямому ущербу, дорогостоящему ремонту и замене деталей, но и к таким косвенным потерям, как снижение коэффициента полезного действия (КПД) и увеличение потребления электроэнергии силовой установки. Вследствие эрозионного изнашивания происходит изменение геометрических параметров передней кромки лопаток, увеличе-

ние шероховатости и зазоров, образование каверн и раковин на поверхности лопаток.

Это, в свою очередь, приводит к потерям на трение из-за образования дополнительных вихрей в приграничном слое, к отрыву потока и ухудшению угла атаки на входе в РК. Поэтому глубокое понимание явления эрозионного изнашивания проточной части РК позволит правильно оценивать ресурс турбомашины и всей системы в целом, а не только ориентироваться на техническое состояние с помощью системы мониторинга и диагностики компрессорного оборудования.

Математические модели эрозии. Для защиты компрессорного оборудования от попадания механических частиц, приводящих к эрозии, применяют системы очистки. Чаще всего компрессорные станции магистральных газопроводов оборудованы масляными вертикальными, мультициклонными вертикальными, циклонными вертикальными и прямоочными горизонтальными пылеуловителями, гравитационными сепараторами, циклонными пылеуловителями и фильтрами-сепараторами. Помимо сухих аппаратов улавливания частиц, используют мокрые аппараты (где частицы пыли удаляются промывочной жидкостью): вертикальные и горизонтальные масляные пылеуловители [2].

Системы очистки газа — барьерные фильтры и инерционные сепараторы — защищают компрессор от попадания твердых частиц и пыли, однако более мелким частицам все же удается проникнуть в него, так как они движутся по линиям обтекания. Также твердые частицы могут попасть в проточную часть при неправильно подобранном фильтре [3].

Механизм распространения эрозии зависит от материала, из которого изготовлены детали проточной части компрессора. Для пластичных материалов характерно постепенное изнашивание с образованием и ростом кратеров. При длительном воздействии РС с твердыми частицами происходит отслаивание материала и его захват потоком РС. Для хрупких материалов характерно постепенное растрескивание материала с образованием и ростом трещин.

Одной из основополагающих в области теории эрозии твердыми частицами является работа И. Финни [4]. Он предложил определять объем материала, удаляемого одной абразивной частицей, следующим образом:

$$Q = \begin{cases} \frac{mV^2}{\rho\psi K} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) & \text{при } \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{K}{6}; \\ \frac{mV^2}{\rho\psi K} \frac{K \cos^2 \alpha}{6} & \text{при } \operatorname{tg} \alpha > \frac{K}{6}, \end{cases}$$

где m — масса частиц; V — скорость частицы при столкновении со стенкой; ρ — коэффициент формы частицы; ψ — угол падения частицы относительно поверхности; α — угол столкновения частицы со стенкой (далее угол столкновения); K — постоянная эрозии.

И. Финни разработал первую детальную аналитическую модель, описывающую эрозию как микрорезание при ударе абразивными частицами. Этот процесс характерен для пластичных материалов, поэтому модель хорошо описывает процесс эрозии при малых углах столкновения и пластичных материалов.

Инженер-исследователь Дж.Г.А. Биттер развил теорию и разработал физико-математическую модель на основе модели Финни, разделив процесс эрозии на два механизма: деформационное разрушение при больших значениях угла столкновения и срез материала при его малых значениях [5, 6]. Общая потеря объема материала от удара одной абразивной частицы определена как

$$W_t = W_d + W_c,$$

где W_d и W_c — деформационный и абразивный износ.

Инженер Дж. Тилли развил модель, предложив учитывать вторичное фрагментирование разрушающихся при ударе частиц [7]. Его модель лучше подходит для описания процесса эрозионного изнашивания твердыми и хрупкими частицами под большими углами столкновения. Для определения эрозионного износа поверхности мишени как совокупности двух физических механизмов — скольжения и микрорезания эрозионной частицы ε_1 и ее дробления на более мелкие ε_2 — выведено выражение

$$\varepsilon = \hat{\varepsilon}_1 \left(\frac{V}{V_r} \right)^2 \left[1 - \frac{9000}{\sqrt{d}V} \right] + \hat{\varepsilon}_2 F_{dv} \left(\frac{V}{V_r} \right)^2,$$

где V — скорость движения частицы при ударе; $\hat{\varepsilon}_1$ — безразмерный коэффициент первичной эрозии при микрорезании; $\hat{\varepsilon}_2$ — безразмерный коэффициент вторичной эрозии от дробления частицы на более мелкие; V_r — опорная скорость, используемая для безразмерности коэффициентов $\hat{\varepsilon}_1$ и $\hat{\varepsilon}_2$; d — диа-

метр частицы; 9000 — константа разрушения кварца, полученная Дж. Тиллем экспериментальным путем; F_{dv} — функция разрушения эрозионной частицы.

И.М. Хатчингс [8] в своей модели отошел от описания процесса эрозии как удара и резания, представив ее как механизм многократных ударов в одну и ту же локальную область, приводящих к накоплению повреждений, развитию микротрещин чаще всего по границам зерен или вокруг включений, с отрывом фрагмента материала после достижения критической плотности повреждений (через N ударов). Этот фрагмент может быть значительно меньше объема кратера от единичного удара. Эрозия определена как массовый износ мишени на единицу массы частицы:

$$E = 0,033 \frac{\alpha \rho \sigma^{1/2} v^3}{\varepsilon_c^2 P^{3/2}},$$

где α — доля кинетической энергии частицы, преобразованная в пластическую деформацию стенки; v — скорость частицы при ударе; ρ и σ — плотность материала частицы и стенки; ε_c — критическая деформация разрушения при эрозии; P — динамическая плотность стенки.

В трудах Й.И. Ока [9, 10] описана модель, позволяющая рассчитать эрозионный износ с учетом твердости материала. В работе Б.С. Маклори [11] предложена модель эрозии, изначально созданная для моделирования течения суспензий, а в настоящее время используемая преимущественно для расчета скоростей распространения эрозии в водной среде.

Процесс эрозионного изнашивания в турбомашинах активно исследуется в последние десятилетия. Экспериментальные методы оценки снижения производительности и срока службы ЦК требуют больших затрат, вследствие чего возникла необходимость в численном моделировании эрозии. Последнее дает возможность визуализировать области подверженные эрозии, так как расчет дает не просто качественную картину, а значения скорости эрозионного изнашивания для каждой точки поверхности. Интегрируя скорость эрозионного изнашивания во времени, можно оценить время до критического истончения или сквозного повреждения элемента, т. е. спрогнозировать межремонтный интервал.

У осевых компрессоров эрозионный износ изучен лучше, что связано с их доминирующим положением в авиационной промышленности,

где при попадании песка или вулканического пепла при высокой скорости потока возникает риск выхода из строя турбомашин, что напрямую влияет на надежность всего транспорта. В 1975 г. Г. Грант и В. Табакофф [12] впервые описали расчет траектории частиц через лопасти осевого компрессора.

В 1987 г. С. Эльфеки и В. Табакофф в работе [13] первыми исследовали поток РС с эрозионными частицами в ЦК, показав, что их столкновение чаще происходит на стороне нагнетания РК, а на стороне всасывания — в основном на передней кромке лопатки.

Эрозия — сложное многофакторное явление, которое зависит от различных параметров: характеристик потока и наличия турбулентности, свойств частиц и их траекторий, а также от состояния поверхности. Однако современные методы вычислительной гидрогазодинамики позволяют получать приближенные к экспериментальным характеристики эрозионного износа РК ЦК.

На базе модели эрозии разработана математическая модель для численного исследования воздействия РС на объект исследования. Методика численного моделирования эрозионного изнашивания проточной части ЦК включает в себя три этапа:

- моделирование течения РС в проточной части ЦК без учета механических примесей;
- моделирование взаимодействия механических частиц и твердой стенки;
- расчет скорости эрозионного изнашивания.

В большей части комплексов вычислительной газовой динамики течение газа в проточной части описывается уравнениями Навье — Стокса с теми или иными упрощениями. Уравнения Навье — Стокса совместно с уравнением неразрывности РС, законом сохранения энергии и уравнением состояния газа однозначно определяют связь между составляющими абсолютной скорости, давлением, температурой и плотностью газа в расчетной точке проточной части [13].

При моделировании процесса эрозии необходимо учитывать факторы, от которых зависит характер его протекания. Основным параметром, определяющим эрозионное изнашивание, является его скорость, характеризующая интенсивность процесса. При повышении скорости течения потока, содержащего механические частицы, интенсивность изнашивания РК ЦК увеличивается.

На сегодняшний день существует множество математических моделей эрозии. Однако почти все они сводятся к определению скорости эрозионного изнашивания ER как скорости движения частиц в момент соударения со стенкой U и эмпирической характеристики n , которая зависит от материала и других рабочих характеристик [14]:

$$ER \sim U^n.$$

Эрозионное изнашивание РК ЦК. Влияние эрозии на РК ЦК можно наблюдать на примере детандер-компрессорного агрегата, работающего на природном газе, в состав которого входят 15 мг/м^3 механических примесей с частицами размером 15 мкм . На рис. 1 виден эрозионный износ лопаток РК. Наибольшее интенсивное влияние эрозионного износа наблюдается на выходящих кромках РК, что согласуется с данными С. Эльфеки и В. Табакофф, приведенными в работе [15].

В качестве примера на рис. 2 показано РК многовального ЦК, работающего в составе теплоэлектроцентрали. Эрозионный износ РК обусловлен наличием золы и сажи, входящих в состав дымового газа, которые в процессе сгорания спекаются. По характеру распределения эрозии можно заключить, что ее интенсивность возрастает в областях повышенных скоростей течения потока и на участках поворота межлопаточного канала РК.

В начальный период развития эрозии на гладкой поверхности идет крайне медленно, но после появления пораженных мест усиливается. Это объясняется накоплением микротрещин, а затем резким поражением поверхности вследствие усиленного ударного действия частиц. Сначала эрозионный износ незначитель-

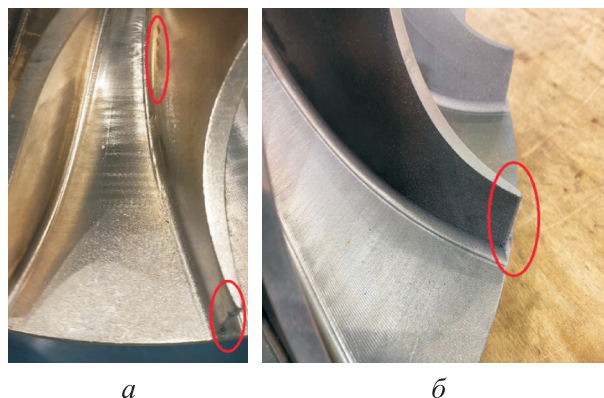


Рис. 1. Внешний вид РК с эрозионным износом

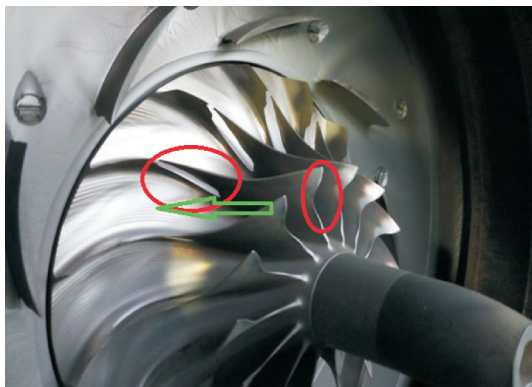


Рис. 2. Внешний вид РК многовального ЦК с эрозионным износом

но влияет на характеристики РК, появляется повышенная шероховатость, которая оказывает влияние на отрыв потока от лопатки. Однако при дальнейшем воздействии эрозионных частиц на РК образуются сквозные перфорации стенок лопаток, что усиливает перетечки и отрыв потока. На этом этапе КПД РК падает и ЦК не в состоянии выдавать заданные параметры, что приводит к непредвиденному останову технологической линии.

Важно заранее оценить ресурс РК, подверженного эрозионному изнашиванию, так как это

приводит не только к непредвиденному выходу из строя ЦК, но и к энергетическим потерям.

Выводы

1. Для прогнозируемой и устойчивой работы технологических систем, в которых задействованы турбомашин, необходимо заранее оценить их ресурс и режимы работы, для чего надо понимать процесс эрозионного изнашивания проточной части.

2. Математические модели эрозии позволяют рассчитать столкновение эрозионных частиц со стенкой и заранее спрогнозировать скорость эрозионного изнашивания.

3. Установлено, что эрозия интенсивнее в местах наибольших скоростей течения потока и на участках изменения кривизны проточной части, где частицы вследствие инерции отклоняются от линий тока и сталкиваются со стенкой, РК подвержены сильному влиянию эрозионных процессов вплоть до сквозного разрушения их лопаток.

4. Показано, что для правильной оценки ресурса и надежности ЦК необходимо учитывать влияние эрозии механическими частицами на РК.

Литература

- [1] СТО Газпром 2-3.5-138–2007. *Типовые технические требования к газотурбинным газам и их системам*. Москва, Газпром, 2007. 35 с.
- [2] Бердник А.Н., Исянов А.Д. Повышение эффективности очистки природного газа от механических примесей и жидкости на компрессорной станции магистрального газопровода. *Ученые заметки ТОГУ*, 2024, т. 15, № 4. URL: <https://togudv.ru/ejournal/pub/articles/3379/>
- [3] Harris P.K. *Erosion in centrifugal compressor impellers*. Ph.D. thesis. Cranfield university school of mechanical engineering, 1996. URL: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/10622>
- [4] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 1960, vol. 3, no. 2, pp. 87–103, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7)
- [5] Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena part I. *Wear*, 1963, vol. 6, no. 1, pp. 5–21, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90003-6)
- [6] Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena part II. *Wear*, 1963, vol. 6, no. 3, pp. 169–190, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5)
- [7] Tilly G.P. A two stage mechanism of ductile erosion. *Wear*, 1973, vol. 23, no. 1, pp. 87–96, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90044-6)
- [8] Hutchings I.M. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear*, 1981, vol. 70, no. 3, pp. 269–281, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90347-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90347-1)
- [9] Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>

- [10] Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 2005, pp. 102–109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
- [11] McLaury B.S., Shirazi S., Shadley J.R. et al. Modeling erosion in chokes. In: *Proceeding of ASME fluids engineering division summer meeting*. ASME, 1996, vol. 236, pp. 773–781.
- [12] Grant G., Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles. *J. Aircraft*, 1975, vol. 12, no. 5, pp. 471–478, doi: <https://doi.org/10.2514/3.59826>
- [13] Калашников Д.А., Борисов Ю.А., Чернышев А.В. Комбинированный метод расчета среднерасходной центробежной компрессорной ступени. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 2, с. 53–64, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-2-53-64>
- [14] Ибрагимов В.Е., Чернышев А.В. Моделирование процесса эрозии рабочего колеса центробежного компрессора. *Будущее машиностроения России. Сб. док. XVII Всерос. конф.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, с. 390–394.
- [15] Elfeki S., Tabakoff W. Erosion study of radial flow compressor with splitters. *ASME J. Turbomach.*, 1987, vol. 109, no. 1, pp. 62–69, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3262071>

References

- [1] STO Gazprom 2-3.5-138–2007. *Tipovye tekhnicheskie trebovaniya k gazoturbinnym gpa i ikh sistemam* [Standard technical requirements for gas turbine gas pumping units and their systems]. Moscow, Gazprom Publ., 2007. 35 p. (In Russ.).
- [2] Berdnik A.N., Isyanov A.D. Increasing the efficiency of natural gas purification from mechanical impurities and liquid at the compressor station of the main gas pipeline. *Uchenye zametki TOGU* [Scientists Notes PNU], 2024, vol. 15, no. 4. URL: <https://togudv.ru/ejournal/pub/articles/3379/> (in Russ.).
- [3] Harris P.K. *Erosion in centrifugal compressor impellers*. Ph.D. thesis. Cranfield university school of mechanical engineering, 1996. URL: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/10622>
- [4] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 1960, vol. 3, no. 2, pp. 87–103, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7)
- [5] Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena part I. *Wear*, 1963, vol. 6, no. 1, pp. 5–21, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90003-6)
- [6] Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena part II. *Wear*, 1963, vol. 6, no. 3, pp. 169–190, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5)
- [7] Tilly G.P. A two stage mechanism of ductile erosion. *Wear*, 1973, vol. 23, no. 1, pp. 87–96, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90044-6)
- [8] Hutchings I.M. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear*, 1981, vol. 70, no. 3, pp. 269–281, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90347-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90347-1)
- [9] Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>
- [10] Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 2005, pp. 102–109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
- [11] McLaury B.S., Shirazi S., Shadley J.R. et al. Modeling erosion in chokes. In: *Proceeding of ASME fluids engineering division summer meeting*. ASME, 1996, vol. 236, pp. 773–781.
- [12] Grant G., Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles. *J. Aircraft*, 1975, vol. 12, no. 5, pp. 471–478, doi: <https://doi.org/10.2514/3.59826>
- [13] Kalashnikov D.A., Borisov Yu.A., Chernyshev A.V. Combined method for calculating the average flow centrifugal compressor stage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 2, pp. 53–64, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-2-53-64> (in Russ.).

- [14] Ibragimov V.E., Chernyshev A.V. [Modeling of centrifugal compressor impeller erosion process]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii. Sb. dok. XVII Vseros. konf.* [Future of Russian Machine Building. Proc. XVII Russ. Conf.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2025, pp. 390–394. (In Russ.).
- [15] Elfeki S., Tabakoff W. Erosion study of radial flow compressor with splitters. *ASME J. Turbomach.*, 1987, vol. 109, no. 1, pp. 62–69, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3262071>

Статья поступила в редакцию 23.01.2026

Информация об авторе

ИБРАГИМОВ Виктор Евгеньевич — аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: v_e_ibragimov@mail.ru).

Information about the author

IBRAGIMOV Viktor Evgenievich — Postgraduate, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: v_e_ibragimov@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ибрагимов В.Е. Проблема эрозионного износа в турбомашинах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 7, с. 69–75.

Please cite this article in English as:

Ibragimov V.E. The problem of erosive wear in turbomachinery. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 7, pp. 69–75.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Компрессорные станции
и установки газового комплекса»**

Автор И.В. Автономова

Изложены основные сведения об оборудовании компрессорных станций магистральных газопроводов, компрессорных станциях в установках переработки попутных нефтяных газов и газов газоконденсатных месторождений, а также компрессорном оборудовании в технологических процессах получения сжиженного природного газа. Рассмотрены технологические схемы компрессорных станций, вопросы их пуска и останова, подбора технологического оборудования, основные требования к конструктивному исполнению нагнетателей и компрессоров компрессорных станций.

Для самостоятельной проработки студентами, обучающимися по направлениям подготовки «Проектирование технологических машин и комплексов» и «Технологические машины и оборудование», материалов дисциплин «Компрессорные станции и установки» и «Компрессорные станции и установки газового комплекса». Приведенные в пособии сведения могут быть использованы в рамках научно-исследовательской работы студентов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>