

УДК 621.311.22

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_45

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА РЕГЕНЕРАТИВНОГО САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

METHOD FOR DETERMINING THE AERODYNAMIC MOMENT OF A REGENERATIVE SELF-ROTATING AIR HEATER

©2025

Трошин Сергей Сергеевич, аспирант кафедры промышленной
теплоэнергетики

Troshin Sergey Sergeevich, postgraduate student of the Department of Industrial
Thermal Power Engineering

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: serega.troshin.97@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2989-7800>

Аннотация: Представлена методика аэродинамического расчёта крутящих моментов, создаваемых потоками уходящих газов и воздуха, а также оценка момента сил трения, возникающая в подшипниках. На основании результатов исследования построена зависимость суммарного аэродинамического момента от угла наклона направляющего аппарата.

Ключевые слова: регенеративный воздухоподогреватель, самовращение, направляющие аппараты, угол наклона, электродвигатель, крутящий момент, момент силы трения, эффективность.

Для цитирования: Трошин, С.С. Методика определения аэродинамического момента регенеративного самовращающегося воздухоподогревателя / С.С. Трошин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 45–52. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_45.

Abstract: The paper presents a methodology for aerodynamic calculation of torque generated by flue gas and air flows, as well as an assessment of friction force moment arising in bearings. Based on the research results, a dependence of the total aerodynamic torque on the guide vane angle has been constructed.

Keywords: regenerative air heater, autorotation, guide vanes, angle of inclination, electric motor, torque, friction force moment, efficiency.

For citation: Troshin, S.S. Method for determining the aerodynamic moment of a regenerative self-rotating air heater / S.S. Troshin // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 45–52. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_45.

ВВЕДЕНИЕ

Регенеративные воздухоподогреватели являются ключевым элементом во многих промышленных процессах, где критически важны высокие температуры и энергоэффективность. Их работа основана на прин-

ципе рекуперации тепла: поток горячих газов нагревает специальную насадку, которая затем отдаёт накопленное тепло холодному воздуху. Этот циклический процесс обеспечивает высокоэффективный теплообмен.

По сравнению с традиционными конструкциями, регенеративные воздухоподо-

греватели обладают рядом существенных преимуществ, включая более полное использование тепловой энергии, снижение вредных выбросов, повышение общей эффективности установки и стабилизацию температурного режима, что положительно сказывается на надёжности системы и позволяет экономить топливо.

В данной статье предлагается модель самовращающегося регенеративного воздухоподогревателя. Её основная идея – частичный отказ от использования электропривода для вращения ротора. Вместо этого для его вращения предлагается использовать кинетическую энергию самих потоков сред (уходящих газов и воздуха), которые направляются на лист насадки воздухоподогревателя под определённым углом. Данное техническое решение, основанное на использовании кинетической энергии потоков уходящих газов и воздуха, является уникальным и позволяет достичь ряда значительных преимуществ. Наиболее очевидным из них является прямая экономия электроэнергии, которая ранее в больших объёмах расходовалась на питание мощного электродвигателя.

УСТРОЙСТВО САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Прототипом является вращающийся регенеративный воздухоподогреватель, описанный в [3, С. 98]. Этот воздухоподогреватель состоит из цилиндрического ротора, закреплённого на валу и разделённого на секторы при помощи перегородок. Внутри каждого сектора находится набивка (теплообменная поверхность). Ротор крутится внутри неподвижного цилиндрического кожуха, к которому подключены газоходы для подачи и отвода греющего и нагреваемого воздуха.

Для обеспечения процесса вращения (самовращения) воздухоподогревателя предлагается установка направляющих аппаратов внутри газоходов на выходе воздуха и дымовых газов в регенеративный воздухоподогреватель.

В предлагаемом воздухоподогревателе в существующие газоходы для входа воздуха

и дымовых газов устанавливаются направляющие аппараты, представляющие собой перегородки, жёстко фиксированные под углом к оси вращения ротора. При этом входные потоки воздуха и газов направлены в противоположные стороны по параллельным друг другу прямым, что обеспечивает равномерное вращательное движение за счёт сопоставимого воздействия на ротор со стороны обеих сред. Расположение перегородок направляющего канала под углом к оси ротора позволяет обеспечить наклонное воздействие потоков сред на теплообменную поверхность, находящуюся в рабочих секторах. Наклонное воздействие потоками уходящих газов и воздуха создаёт крутящий момент и обеспечивает вращение ротора на валу при отключенном электродвигателе или его отсутствии.

На рис. 1 представлены треугольники скоростей до и после направляющего аппарата.

ПРИНЦИП РАБОТЫ САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Самовращающийся регенеративный воздухоподогреватель содержит вал (1), на котором закреплён цилиндрический ротор (2), вращающийся в неподвижном кожухе (3). Ротор разделён радиальными перегородками на рабочие секторы (11), внутри которых уложена набивка в виде секции (поверхность теплообмена). Основания цилиндрического кожуха закрыты верхней (4) и нижней (5) крышками. В крышки вварены газоходы для входа (6) и выхода (7) воздуха, а также для входа (8) и выхода (9) дымовых газов. Внутри входных газоходов (6) и (8) устанавливается направляющий аппарат с жёстко закреплёнными перегородками (12) и (13), обеспечивающий движение входных потоков сред под углом к оси ротора. Для предотвращения взаимных перетоков сред на внутренних сторонах отдельных секторов на верхней и нижней крышках установлены уплотнения (10).

Работа самовращающегося регенеративного воздухоподогревателя осуществляется следующим образом. Поток дымовых газов через газоход (8), вваренный в крышку (4),

проходя через направляющий аппарат (12), меняет направление своего движения и поступает в рабочие секторы ротора (2) под углом к оси вращения вала (1). Поток воздуха, прошедший через газоход (6), вварен-

ный в крышку (5), и направляющий аппарат (13), поступает в рабочие секторы ротора (2) в направлении, противоположном движению дымовых газов, под тем же углом к оси вращения ротора, что и дымовые газы.

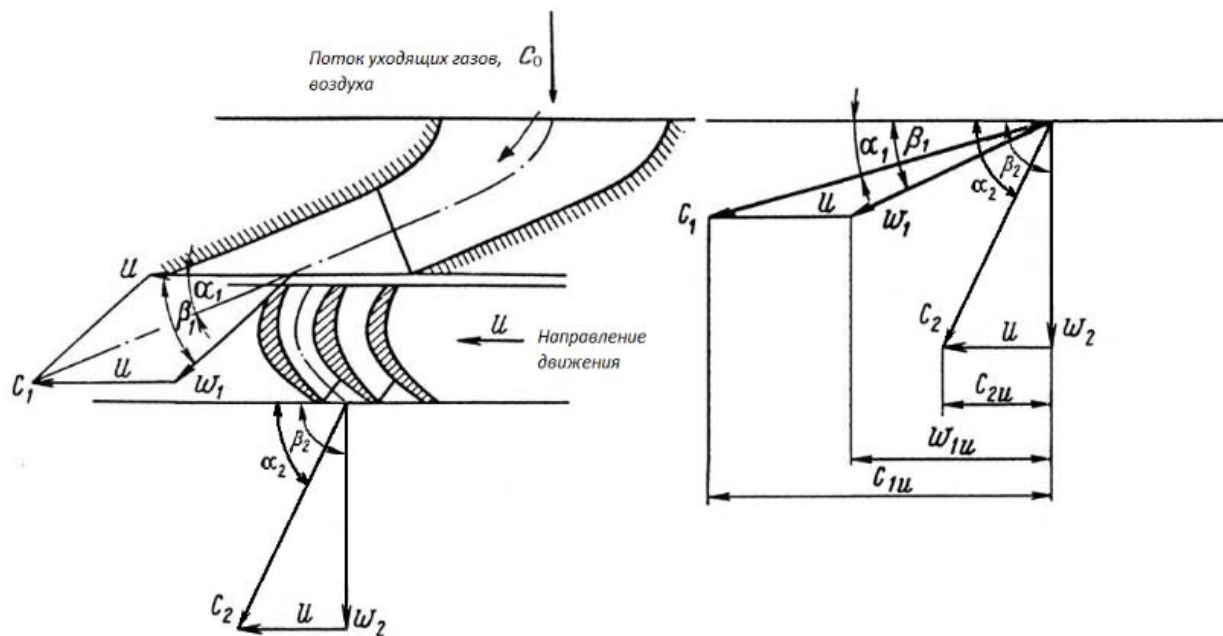


Рис. 1. Треугольники скоростей до и после направляющего аппарата
Fig. 1. Velocity triangles before and after the guide vane

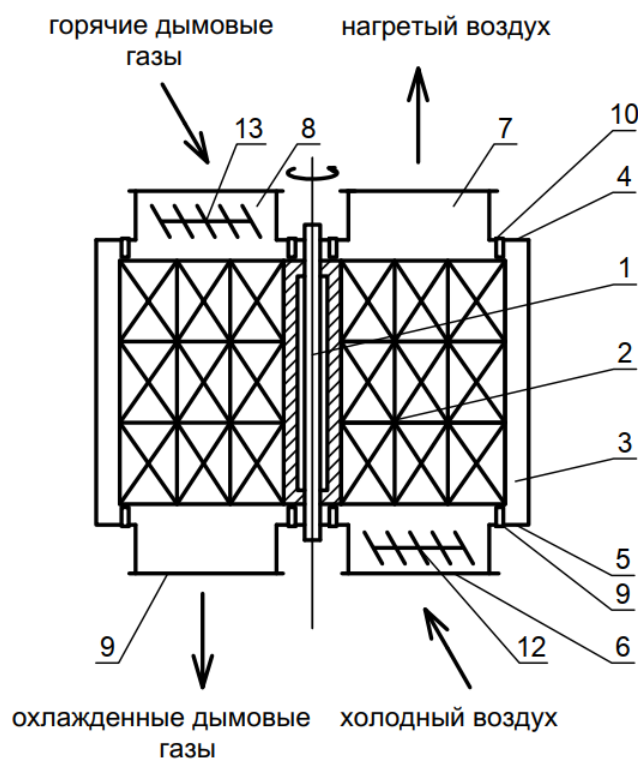


Рис. 2. Самовращающийся регенеративный воздухоподогреватель
Fig. 2. Regenerative self-rotating air heater

Равномерное и непрерывное движение сред обеспечивает вращение ротора с постоянной частотой.

Набивка в виде секции (теплообменная поверхность) попеременно омывается движущимися в противоположном направлении теплоносителями, при этом осуществляется передача теплоты от продуктов сгорания воздуха.

Выход дымовых газов осуществляется через наклонный газоход (9), вваренный в крышку (5), выход воздуха – через газоход (7), вваренный в крышку (4). Выход сред из регенеративного теплообменника осуществляется в направлении, параллельном оси вращения ротора.

На рис. 2 схематично изображено устройство регенеративного самовращающегося воздухоподогревателя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривается регенеративный вращающийся воздухоподогреватель РВВ-41М, представляющий собой теплообменный аппарат регенеративного типа с вращающимся ротором. Конструктивно воздухоподогреватель состоит из следующих элементов:

- цилиндрического ротора диаметром $D = 4,1$ м, высотой $h = 2,25$ м и массой $m = 41,7$ т;

- теплообменной набивки, расположенной в камере регенерации, попеременно нагреваемой уходящими газами и охлаждаемой воздухом;

- системы подводящих и отводящих газоходов (воздуховодов), обеспечивающей раздельное движение уходящих газов и воздуха;

- подшипниковых опор (верхняя опора – роликовый радиально-сферический двухрядный подшипник (тип 3652), нижняя опора – упорно-радиальный роликовый сферический подшипник (тип 9039452));

- приводной системы, представляющей собой электродвигатель мощностью $P = 11$ кВт, обеспечивающий номинальную частоту вращения $n = 2$ об/мин.

Для обеспечения самовращения предлагается установка направляющих аппаратов в существующие газоходы (воздуховоды) на входе воздуха и дымовых газов. Направляющие аппараты представляют собой перегородки, жёстко фиксированные под углом α к оси вращения ротора, обеспечивающие наклонное воздействие потоков сред на теплообменную поверхность, создание крутящих моментов $M_{\text{газ}}$ и $M_{\text{воз}}$ за счёт преобразования осевой скорости потока в окружную.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА РЕГЕНЕРАТИВНОГО САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Сила, действующая на направляющий аппарат, определяется изменением количества движения потока:

$$F = \dot{m} \cdot \Delta W, \quad (1)$$

где $\dot{m}$ – массовый расход, кг/с; ΔW – изменение касательной составляющей скорости потока, м/с.

Массовый расход потоков уходящих газов и воздуха:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho, \quad (2)$$

где Q – расход дымовых газов и воздуха, м³/с; ρ – плотность потоков сред, кг/м³.

Касательная скорость, сообщаемая потоку направляющим аппаратом:

$$W_{\text{кас}} = W_{\text{ос}} \cdot \tan(\alpha), \quad (3)$$

где $W_{\text{ос}}$ – осевая скорость потока, м/с; α – угол установки направляющих аппаратов.

Осевые скорости потоков сред:

$$W_{\text{ос}}^{\text{газ}} = Q_{\text{газ}} \div f_{\text{газ}}, \quad (4)$$

$$W_{\text{ос}}^{\text{воз}} = Q_{\text{воз}} \div f_{\text{воз}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{газ}}$ и $Q_{\text{воз}}$ – расходы дымовых газов и воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; $f_{\text{газ}}$ и $f_{\text{воз}}$ – площади сечения газохода (воздуховода) на входе в ротор воздухоподогревателя, м^2 .

Крутящие моменты, возникающие от потоков уходящих газов и воздуха:

$$M_{\text{газ}} = \dot{m}_{\text{газ}} \cdot W_{\text{кас}}^{\text{газ}} \cdot R_{\text{прил}}, \quad (6)$$

$$M_{\text{воз}} = \dot{m}_{\text{воз}} \cdot W_{\text{кас}}^{\text{воз}} \cdot R_{\text{прил}}, \quad (7)$$

где $R_{\text{прил}}$ – радиус приложения действующих сил, м.

Суммарный аэродинамический момент, возникающий при вращении ротора:

$$M_{\text{аэр}} = M_{\text{газ}} + M_{\text{воз}}, \quad (8)$$

где $M_{\text{газ}}$ и $M_{\text{воз}}$ – крутящие моменты сред уходящих газов и воздуха, Н·м.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА С УЧЁТОМ ОКРУЖНОЙ СКОРОСТИ

При вращении ротора воздухоподогревателя с окружной скоростью U , относительная скорость потока, создающая касательную силу, уменьшается. Тогда относительная касательная скорость для уходящих газов и воздуха будет вычисляться по формуле:

$$W_{\text{кас}}^{\text{реал}} = W_{\text{ос}} \cdot \tan(\alpha) - U, \quad (9)$$

где $W_{\text{ос}}$ – осевая скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; α – угол установки направляющих аппаратов; U – окружная скорость, $\text{м}/\text{с}$.

Окружная скорость, возникающая в результате вращения ротора воздухоподогревателя:

$$U = \pi \cdot D \cdot n / 60, \quad (10)$$

где D – диаметр ротора барабана, м; n – частота вращения, $\text{об}/\text{мин}$.

Сила, действующая на направляющий аппарат с учётом окружной скорости U :

$$F_{\text{реал}} = \dot{m} \cdot (W_{\text{ос}} \cdot \tan(\alpha) - U). \quad (11)$$

Тогда реальные аэродинамические моменты газов и воздуха будут равны:

$$M_{\text{реал}}^{\text{газ}} = F_{\text{реал}}^{\text{газ}} \cdot R_{\text{прил}}, \quad (12)$$

$$M_{\text{реал}}^{\text{воз}} = F_{\text{реал}}^{\text{воз}} \cdot R_{\text{прил}}. \quad (13)$$

Суммарный реальный аэродинамический момент, возникающий в результате вращения ротора воздухоподогревателя:

$$M_{\text{реал}}^{\text{аэр}} = M_{\text{реал}}^{\text{газ}} + M_{\text{реал}}^{\text{воз}}. \quad (14)$$

Установившаяся частота вращения ротора будет достигаться при условии:

$$M_{\text{реал}}^{\text{аэр}} > M_{\text{тр}}. \quad (15)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛ ТРЕНИЯ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

Для оценки момента силы трения в роликовых подшипниках используется формула:

$$M_{\text{тр}} = 0,5 \cdot \mu \cdot F \cdot d, \quad (16)$$

где μ – коэффициент трения; F – нагрузка на подшипник, Н; d – диаметр цапфы (внутренний диаметр подшипника), м.

Осевая нагрузка на упорный нижний подшипник:

$$F_{\text{ос}} = m \cdot g, \quad (17)$$

где m – масса ротора, кг; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Радиальная нагрузка распределена между подшипниками. Для оценки примем суммарную радиальную нагрузку 20 % от осевой:

$$F_{\text{рад}} = 0,2 \cdot F_{\text{ос}} \quad (18)$$

Суммарный момент силы трения складывается из суммы моментов сил трения нижней и верхней опоры подшипников:

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{тр}}^{\text{верх}} + M_{\text{тр}}^{\text{ниж}} \quad (19)$$

Для начала вращения и его поддержания необходимо, чтобы суммарный аэродинамический момент превышал суммарный момент силы трения:

$$M_{\text{аэр}} > M_{\text{тр}} \quad (20)$$

Дополнительно оценить запас по моменту можно по формуле:

$$K_{\text{зап}} = \frac{(M_{\text{аэр}} - M_{\text{тр}})}{M_{\text{тр}}} \cdot 100\% \quad (21)$$

Данная методика позволяет оценить возможность самовращения регенеративного самовращающегося воздухоподогревателя в условиях реальной работы.

ЗАВИСИМОСТЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ОТ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ

Концепция самовращения регенеративного вращающегося воздухоподогревателя (РВП) основана на преобразовании части кинетической энергии потоков теплоносителей в механическую работу вращения ротора. Ключевым элементом такой системы являются направляющие аппараты, устанавливаемые во входных трактах воздуха и уходящих газов. Угол наклона направляющих аппаратов к оси вращения ротора α непосредственно определяет эффективность преобразования энергии и величину создаваемого крутящего момента.

Крутящий момент $M_{\text{кр}}$, создаваемый одним потоком, в первом приближении описывается уравнением:

$$M = \dot{m} \cdot \Delta W \cdot R, \quad (22)$$

где $\dot{m}$ – массовый расход, кг/с; ΔW – изменение касательной составляющей скорости потока, м/с; R – плечо приложения силы.

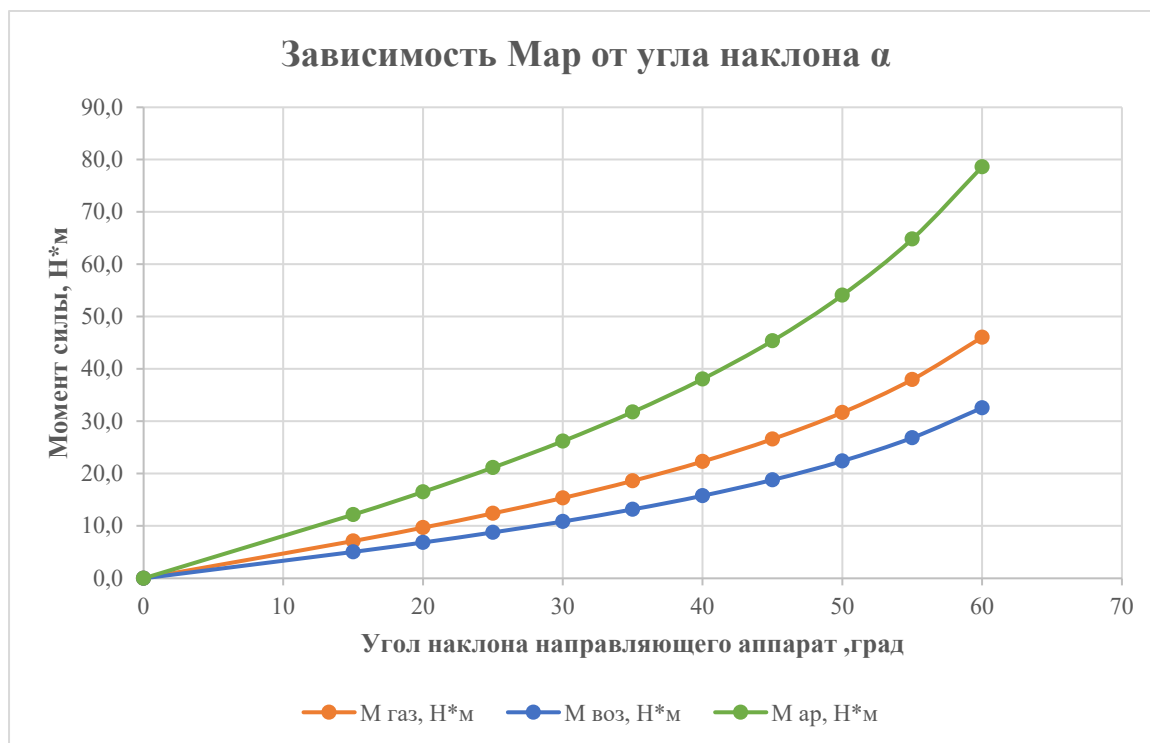


Рис. 3. Зависимость момента силы от угла наклона направляющего аппарата
Fig. 3. Dependence of torque on the guide vane inclination angle

Таким образом, идеальный крутящий момент прямо пропорционален тангенсу угла наклона:

$$M_{ид} \sim \tan(\alpha). \quad (24)$$

При неподвижном роторе при $n = 0$ направляющий аппарат, установленный под углом α , отклоняет осевой поток со скоростью $W_{ос}$. Касательная составляющая скорости, которую приобретает поток, равна:

$$\Delta W_{ид} = W_{ос} \cdot \tan(\alpha). \quad (23)$$

Эта зависимость является фундаментальной: увеличение угла α приводит к росту крутящего момента. Однако её справедливость ограничена диапазоном углов примерно до 60° , после чего резко растут аэродинамические потери и сопротивление.

При вращении ротора с окружной скоростью U точка на роторе воздухоподогревателя уже движется. Эффективная разность скоростей, определяющая силу, равна:

$$\Delta W_{реал} = W_{ос} \cdot \tan(\alpha) - U. \quad (25)$$

Следовательно, реальный крутящий момент с ростом частоты вращения n уменьшается по линейному закону, пока не достигнет нуля при $U = W_{ос} \cdot \tan(\alpha)$. Это накладывает второе важное ограничение: для каждой конфигурации потока и угла α существует теоретический предел частоты вращения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате на рис. 3 представлена зависимость аэродинамического момента от угла наклона направляющего аппарата. За счёт использования кинетической энергии потоков уходящих газов и воздуха данное техническое решение позволяет добиться заметной экономии электроэнергии. Ранее эти объёмы энергии расходовались на обеспечение работы мощного электродвигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакластов А.М., Гробенко В.А., Данилов О.Л. Промышленные тепломассообменные процессы и установки. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 328 с.
2. Бельский А.П., Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях : учебное пособие. Санкт Петербург : СПб ГТУРП, 2012. 136 с. ISBN 978-5-91646-044-5.
3. Боткач И.А. Регенеративные воздухоподогреватели парогенераторов. Москва : Машиностроение, 1978. 175 с.
4. Иванов П.С., Петров М.Г. Теплообменные аппараты энергетических установок / 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 2018. 456 с.
5. Кузнецов В.М., Николаев С.А. Энергосберегающие технологии и теплоэнергетике // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 2 (124). С. 23-29.
6. Михайлов Е.Н. Расчёты моментов трения в подшипниковых узлах тяжёлого оборудования // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 34-38.
7. Петров К.Д. Аэродинамика вращающихся аппаратов // Теплоэнергетика. 2020. № 4. С. 45-52.
8. Сидоров А.В. Регенеративные воздухоподогреватели паровых котлов: теория и расчёт. Санкт Петербург : Политехника, 2019. 312 с.
9. Смирнов Г.А. Современные системы уплотнений вращающегося оборудования // Промышленная энергетика. 2022. № 3. С. 28-34.

REFERENCES

1. Baklastov A.M., Grobenko V.A., Danilov O.L. Industrial Heat and Mass Transfer Processes and Installations. Moscow : Energoatomizdat, 1986. 328 p.
2. Belsky A.P., Lakomkin V.Yu., Smorodin S.N. Energy Savin in Thermal Power Engineering and Heat Technologies : Texbook. Saint Petersburg : SPb GTURP,

2012. 136 p. ISBN 978-5-91646-044-5.
3. Botkach I.A. Regenerative of Steam Generators. Moscow : Mashinostroenie, 1978. 175 p.
4. Ivanov P.S., Petrov M.G. Heat Exchangers of Power Plants / 3rd ed., revised and enlarged. Moscow : Energoatomizdat, 2018. 456 p.
5. Kuznetsov V.M., Nikolaev S.A. Energy-saving technologies in thermal power engineering // Energy Saving and Water Treatment. 2021. № 2 (124). P. 23-29.
6. Mikhailov E.N. Calculations of friction torques in bearing units of heavy equipment // Bulletin of Mechanical Engineering. 2019. № 7. P. 34-38.
7. Petrov K.D. Aerodynamics of rotating apparatuses // Thermal Power Engineering. 2020. № 4. P. 45-52.
8. Sidorov A.V. Regenerative Air Heaters of Steam Boilers: Theory and Calculation. Saint Petersburg : Polytechnica, 2019. 312 p.
9. Smirnov G.A. Modern sealing systems for rotating equipment // Industrial Power Engineering. 2022. № 3. P. 28-34.