ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Энергетика*

Разработка инженерной методики определения норматива потребления электроэнергии аппаратами воздушного охлаждения

Д.Е.Филимошина
ООО «ГЦЭ-энерго», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Филимошина Д.Е. Разработка инженерной методики определения норматива потребления электроэнергии аппаратами воздушного охлаждения // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 55-67. EDN MLIHXQ

Аннотация
С учетом ежегодно растущей потребности в электроэнергии для промышленных предприятий становится актуальным вопрос сокращения расходов на электропотребление. В рамках данного исследования рассматривалось потребление электроэнергии аппаратами воздушного охлаждения (АВО) на газоперерабатывающем предприятии. Изменение температуры окружающей среды (в течение суток и в зависимости от сезона) является основным возмущающим фактором, влияющим на работоспособность АВО. При таких значительных сезонных изменениях температуры наружного воздуха меняется его плотность, что вызывает колебания потребляемой электродвигателем мощности до 30 %. В связи с этим становятся важными вопросы повышения энергетической эффективности, прогнозирования и определения нормы электропотребления АВО в зависимости от изменяющихся внешних условий. Разработана методика для определения нормативного электропотребления аппаратами воздушного охлаждения в зависимости от двух факторов – температуры окружающей среды и загрузки установки переработки газа. В связи с нелинейными зависимостями по загрузке установки и по температуре окружающей среды проводилась двухфакторная степенная аппроксимация значений. С высокой точностью (среднеквадратичное отклонение расчетного и аппроксимирующего значений не превышает 1 %) определена зависимость электропотребления от температуры окружающей среды и загрузки установки по сырью для любого типа АВО. По результатам исследования была выведена формула расчета нормативного потребления электрической мощности АВО на рассматриваемой установке. Методика может быть использована сотрудниками газоперерабатывающих предприятий для определения потребления электроэнергии АВО за расчетный промежуток времени при изменяющихся климатических и технологических факторах.

Ключевые слова
аппарат воздушного охлаждения; газоперерабатывающее предприятие; потребление электроэнергии; энергоэффективность; нормирование; температура окружающей среды

Поступила: 26.03.2025 ***Принята: 09.10.2025*** ***Онлайн: 27.11.2025*** ***Опубликована: 27.02.2026***

Введение

В связи с высокой энергоемкостью [1] одним из приоритетных направлений для всех видов производств в России и мире является сокращение и оптимизация расходов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [2], в том числе электрической энергии, что выделено в один из трендов концепции 4D [3]. Так, тренд «decrease» означает снижение потребления всех видов ресурсов и материалов, а также количества производимых отходов. При этом в 2022-2050 гг. прогнозируется повышение промышленного потребления электроэнергии в мире на 83 %.[1]

В последние годы отмечается снижение объемов добычи и транспортировки газа в связи с внешними факторами. Развитие отрасли зависит как от зарубежных поставок оборудования (что затрудняет ввод новых мощностей), так и от спроса на энергоресурсы, при этом стоимость электроэнергии повышается [4, 5]. В связи с этим много исследований ведется в направлении покрытия пиковой нагрузки средствами систем накопления электроэнергии для снижения затрат на объектах газовой промышленности [6-8].

[1] Сценарии развития мировой энергетики до 2050 года. URL: https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/stsenarii-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2050-goda/ (дата обращения 26.03.2025).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На объектах добычи, транспортировки и переработки газа значительный объем затрат на электрическую энергию определяется работой насосов [9], компрессоров [10], различного тягодутьевого, вентиляционного оборудования и аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [11], которые являются объектами данного исследования, а также их конструктивными особенностями и степенью износа. Режим работы указанного оборудования может зависеть от многих факторов, которые в разной степени влияют на электропотребление. Так, АВО на территории Российской Федерации эксплуатируются в широком диапазоне температур: от –45 до +50 °С [12]. Изменения температуры окружающей среды (в течение суток и в зависимости от сезона) являются основным возмущающим фактором, влияющим на работу аппаратов воздушного охлаждения и их работоспособность [13, 14]. При таких значительных сезонных изменениях температуры окружающей среды меняется тепловой поток и появляется необходимость увеличения расхода воздуха, что вызывает соответствующие колебания потребляемой электродвигателем мощности – до 30 % [15, 16]. В то же время при отрицательных температурах окружающей среды (в зимний период в северных регионах) АВО может вообще не включаться в работу.

С другой стороны, на электропотребление АВО влияет загрузка установки переработки газа, в состав которой входит АВО. В зависимости от технологического процесса (объема транспортируемого или перекачиваемого газа) необходимость включения АВО также может носить ступенчатый характер даже в летний период. В связи с этим на следующем этапе работы требуется учесть и классифицировать промышленные объекты как типовые по нескольким параметрам в совокупности (технологический процесс, месторасположение региона, тип технологии и т.д.).

Согласно статье [17], эффективность работы каждого типа АВО не является постоянной в процессе эксплуатации, а характеризуется определенной динамикой, что обусловлено сменой режима работы технологического участка/установки, а также изменением климатических условий. Снижение удельных затрат на единицу добываемой и перерабатываемой продукции, т.е. газа или газового конденсата, в том числе в секторе транспортировки и распределения (на объектах транспорта газа – компрессорных станциях) [18-20], является важным научно-техническим направлением исследований для развития газовой промышленности [21].

Также одним из актуальных направлений является применение цифровых двойников технологического оборудования на объектах нефтегазовой промышленности [22, 23]. Так, цифровой двойник АВО – это виртуальная модель, представляющая собой точную копию реального устройства, используемая для моделирования, анализа и оптимизации его работы. Цифровой двойник АВО может включать физические параметры, характеристики теплообмена, аэродинамику и другие важные факторы и использоваться для следующих целей:

• оптимизация работы – моделирование различных сценариев работы АВО, определение оптимальных режимов работы для повышения эффективности и снижения энергопотребления [24];

• прогнозирование неисправностей на основе данных, собранных с реального оборудования, цифровой двойник может предсказывать возможные поломки и неисправности, что позволяет проводить профилактическое обслуживание и избегать простоев [25];

• улучшение конструкции – тестирование новых конструктивных решений и оптимизация формы и размеров элементов АВО для повышения его эффективности;

• обучение персонала работе с АВО, не подвергая риску реальное оборудование;

• управление жизненным циклом – отслеживание состояния АВО от проектирования до утилизации.

Методика, представленная в данном исследовании, может послужить основой для создания, внедрения и использования на предприятиях современных решений в области цифровизации.

Становится актуальным вопрос повышения энергетической эффективности [26, 27], моделирования [28-30], прогнозирования [31, 32] и определения нормы электропотребления АВО в зависимости от изменяющихся внешних условий, таких как температура окружающей среды и загрузка установки. Однако в исследованиях российских авторов, например в [33, 34], предлагаются математические модели, описывающие работу АВО и предназначенные для разработки методов управления режимами работы АВО для снижения потребления электроэнергии, в которых только

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

один фактор (температура окружающей среды) отражается как влияющий на колебания электропотребления АВО. В работах зарубежных авторов [35, 36] помимо температуры учитывается влияние скорости ветра на процесс охлаждения аппаратами.

Целью данного исследования является разработка методики для определения нормативного потребления электроэнергии АВО в зависимости от двух изменяющихся факторов – температуры окружающей среды и загрузки установки переработки газа.

Методика исследования включает решение следующих задач:

• определение наличия исходных данных, таких как технические характеристики и параметры АВО, тепловая нагрузка АВО по результатам предварительного моделирования установки переработки газа;

• расчет массового расхода воздуха через АВО;

• расчет норматива потребляемой мощности АВО с учетом КПД двигателей;

• аппроксимация значений наименьшей полиномиальной функцией нормативного потребления электроэнергии с отклонением аппроксимированного и расчетного значений не более 5 %;

• определение коэффициентов двухфакторной аппроксимации для формирования итоговой зависимости норматива потребления электроэнергии АВО от температуры окружающей среды и загрузки установки.

Методы

Потребление топливно-энергетических ресурсов технологическим и вспомогательным оборудованием промышленных предприятий зависит от ряда факторов, основным из которых является объем производства.

Исходными данными для разработки формул расчета нормативного потребления ТЭР технологическим оборудованием является перечень оборудования, а также статистические данные по режимам его эксплуатации. Эти данные регистрируются на предприятиях и используются при планировании объемов выпуска продукции. В качестве исходных данных по режимам эксплуатации технологического оборудования могут быть использованы следующие: выгрузка из просмотровой системы учета, режимные листы, карты, технологические регламенты, проектные данные. Статистические данные при разработке формул расчета нормативного потребления ТЭР используются только для определения технологических параметров, влияющих на энергопотребление производств и оборудования.

Одной из задач при разработке данной методики определения нормативных значений потребления является использование для расчета простых формул, не требующих применения специализированного оборудования или программного обеспечения (ПО), с возможностью дальнейшего применения методики специалистами газоперерабатывающих предприятий. Математическое моделирование технологических установок и процессов с использованием специализированного программного обеспечения представляет собой трудоемкий процесс и не является оптимальным решением для достижения целей данного исследования. По этой причине по завершении расчета теоретически необходимого объема потребления ТЭР в зависимости от объемов выпуска продукции/переработки сырья и температуры окружающей среды проводится аппроксимация результатов проведенных расчетов для разработки формул расчета объема потребления без использования специализированных средств.

Аппроксимация – научный метод, заключающийся в замене одних математических объектов другими, близкими к исходным [37]. В частности, она является основой для аналитического представления табличных данных функцией заданного вида с неизвестными параметрами, значения которых определяются так, чтобы график функций был по возможности максимально близок к заданным точкам. При проведении аппроксимации для упрощения формул расчета используются степенные полиномы минимальной степени, позволяющей обеспечить необходимую точность расчета. Алгоритм разработки расчетных формул абсолютного потребления технологического оборудования представлен на рис.1. Приведенный алгоритм применяется для каждой единицы оборудования.

В зависимости от наличия исходных данных и области применения каждой позиции оборудования возможно использование двух методик определения тепловой нагрузки АВО:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

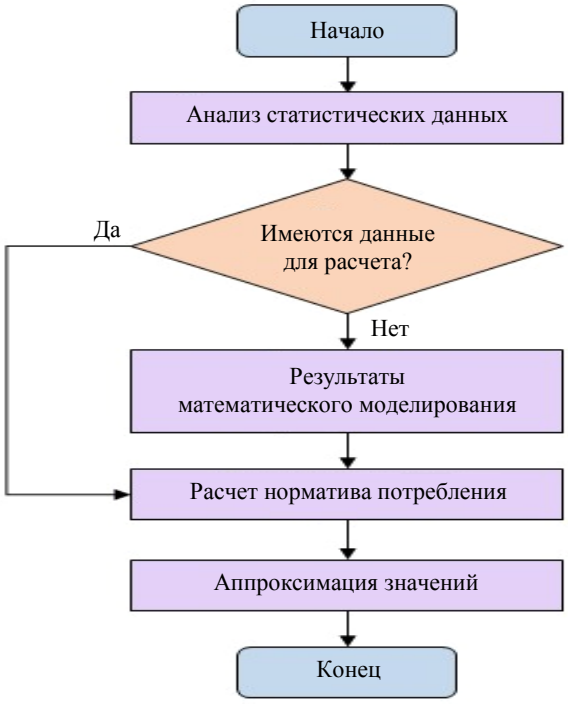


Рис.1. Алгоритм разработки расчетных формул нормативов потребления электроэнергии

• по данным математического моделирования технологических установок;

• по расходу, температуре охлаждаемой среды на входе и максимально допустимой температуре на выходе АВО.

В статье рассматривается методика по данным математического моделирования технологических установок, пригодная для применения инженерно-техническим персоналом (ИТР) и использующая два изменяющихся параметра, что позволяет получить наиболее точный результат. Методика разработки расчетных формул нормативного расхода электрической энергии аппаратами воздушного охлаждения представлена на примере установки стабилизации конденсата (УСК) газоперерабатывающего предприятия. Дальнейшие расчеты проводились в программной среде Microsoft Office Excel, что является достаточным для выполнения задачи.

В качестве исследуемого объекта рассматривался аппарат воздушного охлаждения ВХ-101, который расположен в составе УСК завода по стабилизации конденсата. Основным параметром, определяющим производительность УСК, является объем сырья – перерабатываемой нефтегазоконденсатной смеси (НГКС). На рис.2 представлена блок-схема установки стабилизации конденсата.

НГКС поступает на технологическую нитку установки из общего коллектора и проходит последовательно трубное пространство теплообменников Т-101/1-3, где нагревается до температуры 80-120 °С обратным потоком стабильного конденсата, выходящим из кубовой части колонны стабилизатора К-101/1. Нагретая до температуры 80-120 °С, НГКС поступает на 20-ю тарелку в средней части стабилизатора К-101/1. Колонна стабилизации К-101/1 предназначена для разделения НГКС на стабильный конденсат (СК) и широкую фракцию легких углеводородов (ШФЛУ) путем ректификации. Колонна К-101/1 представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат переменного сечения, внутри которого расположены 38 массообменных клапанных тарелок. Вывод СК производится в сырьевой парк или в линию некондиции.

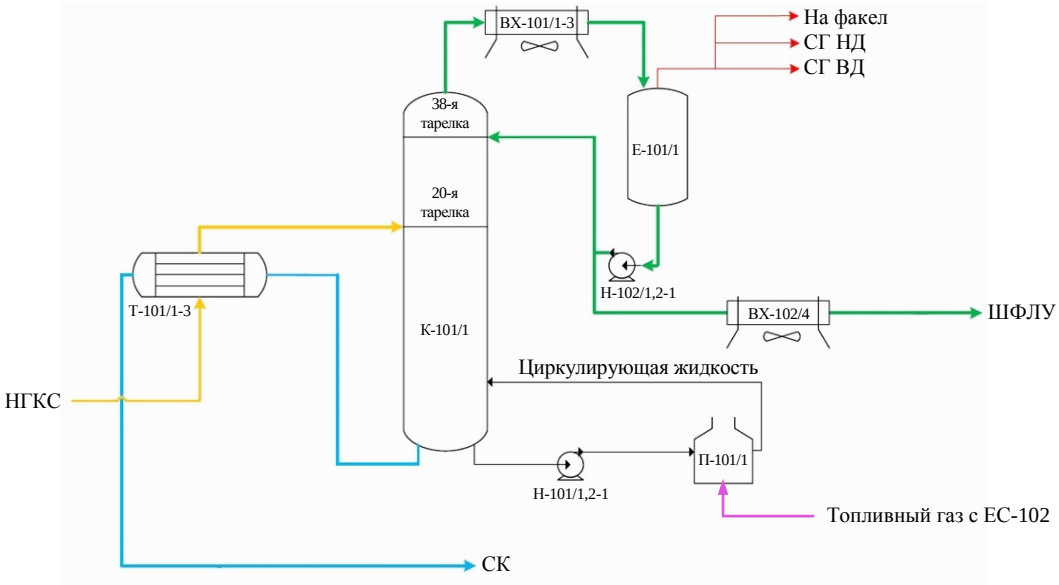


Рис.2. Технологическая блок-схема установки стабилизации конденсата

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Пары ШФЛУ с верха стабилизатора К-101/1 направляются в параллельно работающие воздушные холодильники ВХ-101/1-3, где охлаждаются до температуры 25-60 °С, частично конденсируются и поступают в емкость орошения Е-101/1.

На воздушных холодильниках смонтирована система орошения химически очищенной водой трубных пучков холодильников-конденсаторов в летний период для уменьшения количества сбросных газов. Частично сконденсированная ШФЛУ из емкости Е-101/1 поступает на прием насосов Н-102/1,2-1, при помощи которых часть ШФЛУ подается на верхнюю тарелку стабилизатора К-101/1 в качестве острого орошения для поддержания температурного режима верха стабилизатора. Балансовое количество ШФЛУ проходит через воздушный холодильник ВХ-102/4, где доохлаждается до температуры не более 40 °С и направляется для дальнейшей переработки или выводится в качестве готовой продукции в парки товарно-сырьевой базы или в линию некондиционного продукта (НП).

Для поддержания необходимого температурного режима стабилизатора К-101/1 производится циркуляция постоянного количества кубовой жидкости насосами Н-101/1-1, Н-101/2-1 через печь П-101/1 и возврат парожидкостной смеси в нижнюю часть стабилизатора под нижнюю тарелку. Из куба стабилизатора К-101/1 под собственным давлением в колонне выводится балансовое количество стабильного конденсата, который последовательно проходит межтрубное пространство теплообменников Т-101/1-3, отдает тепло НКГС и охлаждается до температуры не выше 40 °С, поступает в общий коллектор, по которому выводится. Вывод стабильного конденсата в линию некондиции производится при пусковых, остановочных операциях технологических линий, а также если качество стабильного конденсата не соответствует предъявляемым требованиям.

Аппарат воздушного охлаждения ВХ-101/1-3 является конденсатором верхнего продукта колонны. На указанной позиции установлен АВО типа АВЗ-20-2,5-Б1/8-4-6. АВО зигзагообразные типа АВЗ предназначены для конденсации и охлаждения парообразных, газообразных и жидких сред [38]. В соответствии с данными технологического регламента на установку, а также ОСТ 26-02-537-79[2], основные параметры АВО, необходимые для разработки норматива потребления электроэнергии (исходные данные): тип – АВЗ-20-2,5-Б1/8-4-6; поверхность теплообмена по трубкам – 440 м^2, по оребрению – 5300 м^2; размер – 6,0×6,47 м; количество секций – 3; мощность вентилятора 90 кВт.

К потреблению аппаратами воздушного охлаждения относится расход электрической энергии на привод вентиляторов, который определяется необходимым расходом воздуха через вентилятор. В свою очередь, необходимый расход воздуха определяется тепловой нагрузкой АВО (тепловой мощностью, сбрасываемой в атмосферу), а также разницей температур охлаждаемой среды и окружающего воздуха.

Обсуждение результатов

При разработке методики нормирования базовых показателей необходимо обеспечить привязку расчетов к указанным факторам, т.е. выявить зависимость производительности отдельного оборудования, например печи [39, 40] или ребойлера колонны, от объема выпуска продукции или переработки сырья технологической установкой. Для расчета теоретически необходимого объема потребления энергетических ресурсов технологическим оборудованием предприятий может быть применено математическое моделирование технологических установок в программном обеспечении Aspen Hysys.

При моделировании режимы работы установок и отдельного оборудования принимаются в соответствии с доступными статистическими данными. Моделирование проводится в условиях работы установок и отдельного оборудования при нескольких значениях производительности, что позволяет определить теоретически необходимый расход энергии. Результатом проведенного математического моделирования технологических установок являются поэлементные теоретически необходимые нагрузки технологического оборудования.

[2] ОСТ 26-02-537-79 «Аппараты воздушного охлаждения зигзагообразные с двумя вентиляторами. Основные параметры и размеры».

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На основании результатов математического моделирования в зависимости от типа исследуемого оборудования проводится дополнительный расчет, целью которого является определение зависимостей теоретического расхода ТЭР от производительности установки и температуры окружающей среды с учетом особенностей оборудования. Так, для АВО проводится оценка потребления электроэнергии вентиляторами для обеспечения необходимого теплосъема.

Потребляемая расчетная мощность для электродвигателя вентилятора на стадии разработки проекта должна быть увеличена на 10 % для обеспечения пуска двигателя. В проектной документации расчет производится на максимальную загрузку установки, поэтому не предусмотрен расчет потребляемой мощности АВО в зависимости от загрузки установки. В данном исследовании полученная зависимость позволяет определить значение потребления мощности аппаратом воздушного охлаждения при определенной загрузке установки в конкретный момент времени. Из-за использования двухфазной охлаждаемой среды тепловая нагрузка на аппарат воздушного охлаждения определялась по результатам математического моделирования колонны при различной загрузке установки (рис.3). При расходе сырья 100 м^3/ч тепловая нагрузка составляет 252,9 (4860) кДж/кг (кВт); при 150 м^3/ч тепловая нагрузка 252,8 (7290) кДж/кг (кВт); при 200 м^3/ч тепловая нагрузка 252,8 (9718) кДж/кг (кВт); при 250 м^3/ч тепловая нагрузка 252,7 (12145) кДж/кг (кВт); при 300 м^3/ч тепловая нагрузка 252,97 (14570) кДж/кг (кВт);

Температуры охлаждаемой среды на входе и выходе АВО в соответствии с анализом статистических данных приняты равными постоянным значениям для режима работы установки. Усредненные для режима работы установки значения температур охлаждаемой среды (верхнего продукта колонн) на входе 70,0 °С, на выходе – 52,6 °С.

Возможность теплообмена одной секции АВО (сброса тепла в атмосферу) рассчитывается с помощью уравнения теплопередачи

$$Q_{АВО} = K_1 K F \theta_т,$$

где K_1 – коэффициент нормативного ухудшения технического состояния АВО за период эксплуатации; K – коэффициент теплопередачи данного типа АВО, Дж/кг·°С; F – площадь оребренной поверхности теплообмена, м^2; $\theta_т$ – среднелогарифмическая разность температур.

Среднелогарифмическая разность температур

$$\theta_т = (\theta_1 - \theta_2)/LN(\theta_1/\theta_2);$$

$$\theta_1 = t_1 - T_2;$$

$$\theta_2 = t_2 - T_1,$$

где T_1 – температура наружного воздуха, °С; T_2 – температура воздуха за АВО, °С,

$$T_2 = T_1 + Q/(nG_в C_{рв});$$

n – количество установленных секций АВО; $G_в$ – расход воздуха через одну секцию АВО, кг/с; $C_{рв}$ – теплоемкость воздуха, Дж/кг·°С.

Исходя из представленных зависимостей был рассчитан необходимый расход воздуха через АВО (табл.1). На основании данных табл.1 и типовой зависимости потребляемой мощности АВО от расхода воздуха (рис.4) был проведен расчет нормативного расхода электроэнергии на привод АВО.

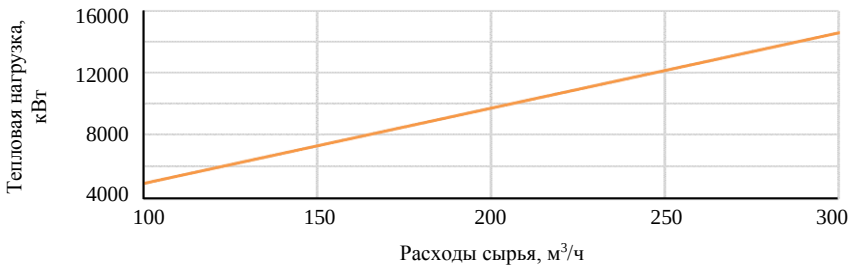


Рис.3. Расчетное значение тепловой нагрузки АВО в зависимости от загрузки и режима работы установки

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 1

Расход воздуха через АВО, кг/с

Загрузка, м³/ч	$T_{ос}$, °С				
	–40	–20	0	20	30
100	50,7	64,2	87,6	137,6	192,6
150	76,0	96,3	131,3	206,4	288,9
200	101,4	128,4	175,1	275,1	385,2
250	126,7	160,4	218,8	343,8	481,3
300	152,0	192,5	262,5	412,5	577,5

Примечание. $T_{ос}$ – температура окружающей среды.

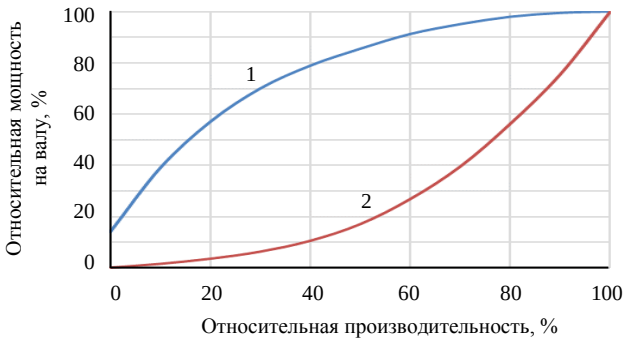


Рис.4. Типовая зависимость потребляемой мощности вентилятора от его производительности
1 – дросселирование; 2 – частотное регулирование

При отсутствии частотно-регулируемого привода (ЧРП) мощность электропривода вентиляторов АВО определяется по типовой зависимости на рис.4. Потребляемая мощность электропривода вентиляторов АВО при наличии ЧРП вычисляется по формуле

$$N_{АВО} = \frac{N_0}{\eta_{эд}\,\eta_{пч}} \left(\frac{p_a}{p_{ст}} \frac{T_{ст}}{T_{ос}} \right) \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^3,$$

где N_0 – номинальная мощность АВО согласно паспортной документации, кВт; $\eta_{эд}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя; $\eta_{пч}$ – коэффициент полезного действия преобразователя частоты; p_a – барометрическое давление, МПа; $p_{ст}$, $T_{ст}$ – давление и температура в стандартных условиях соответственно, $p_{ст}$ = 101325 Па, $T_{ст}$ = 293,15 К; $n_{ном}$, n – номинальная и действительная частота вращения вала ЭД соответственно, об/мин.

В последующих расчетах были учтены следующие параметры:

- типовая зависимость потребляемой мощности вентилятора от его производительности;
- тип регулирования расхода воздуха (отсутствие регулирования, жалюзи, наличие ЧРП);
- мощность электродвигателя одной секции;
- количество секций;
- коэффициент загрузки двигателя в номинальном режиме (принят равным 0,8);
- метод включения вентиляторов (параллельно или последовательно).

Номинальный КПД двигателя определялся по международному стандарту IEC[3].

Результаты расчета нормативного расхода электроэнергии на привод АВО представлены в табл.2.

Зависимость потребляемой мощности АВО нелинейна и от температуры окружающей среды, и от загрузки установки (рис.5), на рис.6 зависимости представлены в двухмерном виде.

В исследовании проведен расчет режимов работы АВО в 25 точках. Поскольку расчеты являются комплексными, их использование непосредственно на предприятии в данном виде нецелесообразно. Поэтому была проведена полиномиальная двухфакторная аппроксимация значений потребления электроэнергии АВО. В связи с нелинейными зависимостями как по загрузке установки, так и по температуре окружающей среды, степенная аппроксимация значений проводилась методом наименьших квадратов, реализованная в программном обеспечении Microsoft Office Excel. При этом степень полинома подбиралась минимальная (для сокращения сложности функции), дающая ошибку не более 5 % в любой из расчетных точек.

[3] ГОСТ IEC 60034-30-1-2016 Машины электрические вращающиеся. Часть 30-1. Классы КПД двигателей переменного тока, работающих от сети (код IE).

ГОСТ IEC/TS 60034-30-2-2021 Машины электрические вращающиеся. Часть 30-2. Классы эффективности двигателей переменного тока с регулированием частоты вращения (код IE).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Нормативная потребляемая мощность в зависимости от производительности и температуры окружающей среды

Загрузка, м³/ч	$T_{ос}$, °С				
	–40	–20	0	20	30
Механическая мощность привода вентиляторов с учетом поочередной загрузки, кВт					
100	63,42	71,73	85,15	109,34	130,77
150	78,70	89,81	106,61	135,54	159,08
200	92,41	105,30	124,36	155,74	177,64
250	104,53	118,74	139,64	170,47	192,57
300	115,34	130,72	152,49	182,02	203,40
Норматив потребляемой мощности АВО с учетом КПД двигателей, кВт					
100	98,67	103,81	112,28	129,63	148,09
150	108,15	115,35	127,48	152,47	174,89
200	117,11	126,46	142,33	171,65	193,06
250	125,87	137,43	156,29	186,02	207,88
300	134,55	148,05	168,51	197,37	218,91

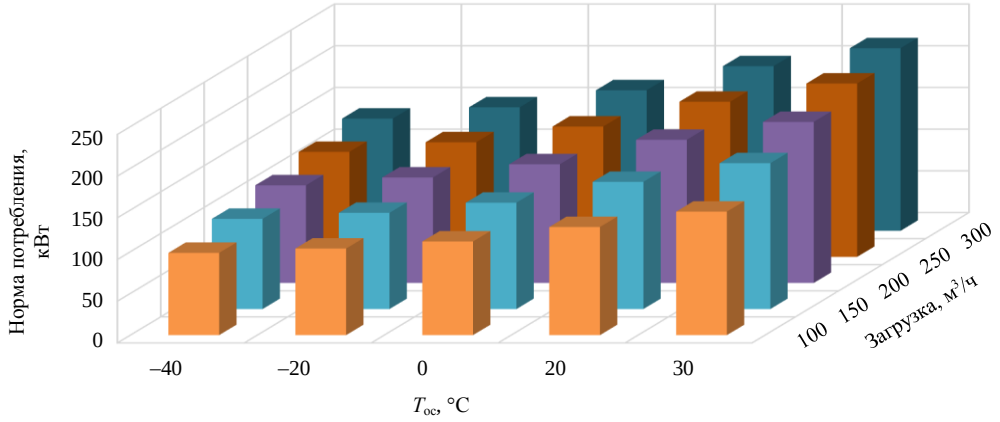


Рис.5. Зависимость потребляемой мощности АВО от загрузки установки и температуры окружающей среды

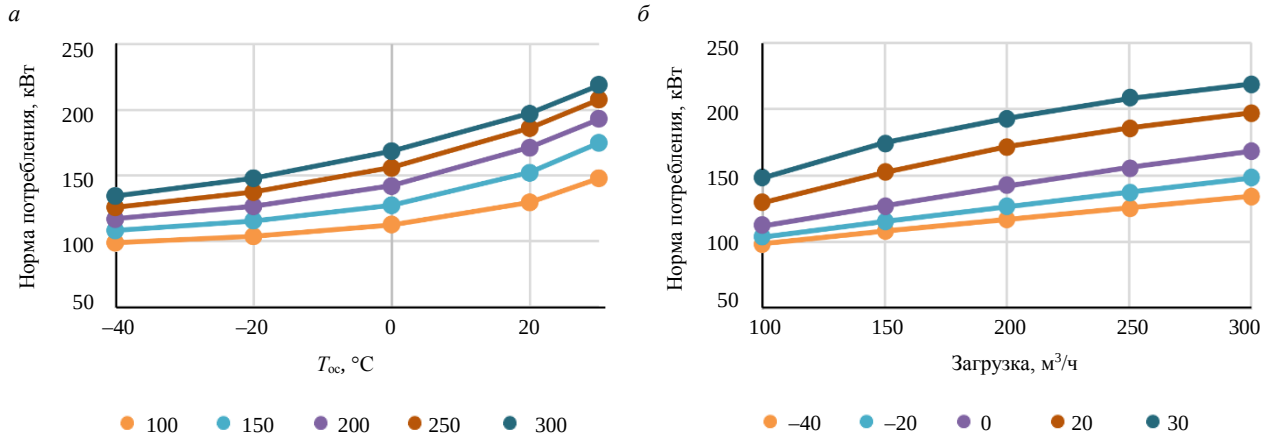


Рис.6. Зависимость потребляемой мощности АВО от температуры окружающей среды при различной загрузке установки (*а*), от загрузки установки (*б*)

Минимальные степени полинома, полученные по результатам анализа, следующие: по загрузке Q, м^3/ч – 2-я степень, по температуре окружающей среды $T_{ос}$, °С – 2-я степень. Результаты подбора аппроксимированных значений потребляемой мощности аппаратом воздушного охлаждения представлены в табл.3.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 3

Результаты подбора аппроксимированных значений потребляемой мощности АВО

Загрузка, м³/ч	$T_{ос}$, °С				
	–40	–20	0	20	30
Норматив потребления мощности, кВт					
100	98,67	103,81	112,28	129,63	148,09
150	108,15	115,35	127,48	152,47	174,89
200	117,11	126,46	142,33	171,65	193,06
250	125,87	137,43	156,29	186,02	207,88
300	134,55	148,05	168,51	197,37	218,91
Аппроксимированное значение норматива потребления мощности, кВт					
100	99,78	101,50	112,51	132,80	146,42
150	108,97	113,18	128,42	154,68	171,95
200	117,89	124,70	143,06	172,99	192,29
250	126,54	136,04	156,44	187,72	207,45
300	134,92	147,22	168,54	198,88	217,43
Отклонение аппроксимированного и расчетного значений, %					
100	1,117	–2,226	0,209	2,438	–1,128
150	0,753	–1,880	0,740	1,453	–1,682
200	0,663	–1,397	0,518	0,782	–0,397
250	0,532	–1,010	0,095	0,914	–0,203
300	0,274	–0,559	0,017	0,761	–0,676

Среднеквадратичное отклонение – 0,301 %

По результатам сравнения аппроксимирующих кривых и расчетных значений нормативов потребления электроэнергии был сделан вывод об удовлетворительной сходимости аппроксимирующего полинома и расчетных значений (среднеквадратичное отклонение по всем точкам не превышает 1 %). По результатам аппроксимации полученная зависимость будет иметь вид:

$$f(Q, T_{ос}) = (a2{,}1Q^2 + b2{,}1Q + c2{,}1)\, T_{ос}^2 + (a1{,}1Q^2 + b1{,}1Q + c1{,}1)\, T_{ос} + (a0{,}1Q^2 + b0{,}1Q + c0{,}1),$$

где Q – загрузка сырья, м³/ч; a, b, c – коэффициенты двухфакторной аппроксимации, отн.ед. (табл.4).

Таблица 4

Коэффициенты двухфакторной аппроксимации, отн.ед.

Обозначение	Значение	Физический смысл коэффициентов
$a2{,}1$ $b2{,}1$ $c2{,}1$	$-3{,}012\cdot10^{-7}$ $1{,}189\cdot10^{-4}$ $2{,}724\cdot10^{-3}$	Коэффициент при $x2$ (коэффициент при старших степенях x) отражает нелинейные компоненты, которые могут указывать на наличие кривизны, колебаний или других сложных зависимостей в процессе
$a1{,}1$ $b1{,}1$ $c1{,}1$	$-1{,}706\cdot10^{-5}$ $9{,}369\cdot10^{-3}$ 0,01598	Коэффициент при $x1$ (линейный коэффициент) определяет скорость изменения функции (наклон) относительно переменной x (зависимость потребления АВО при пропорциональном изменении загрузки установки и температуры окружающей среды)
$a0{,}1$ $b0{,}1$ $c0{,}1$	$-2{,}542\cdot10^{-4}$ 0,3818 76,87	Свободный член (коэффициент при $x0$) – начальное значение функции в точке $x = 0$ или базовый уровень (базовое значение потребления АВО согласно исходным техническим параметрам и данным оборудования)

При интерпретации коэффициентов необходимо учитывать контекст задачи, физический смысл переменных и единицы измерения. Не все коэффициенты могут иметь очевидный физический смысл в каждом конкретном случае, некоторые из них могут быть просто математическими артефактами, отражающими сложность аппроксимируемого процесса. По результатам определения коэффициентов двухфакторной аппроксимации была сформирована формула расчета нормативного потребления мощности для АВО в рамках установки АВЗ-20-2,5-Б1/8-4-6

$$f(Q, T_{ос}) = (-3{,}012\cdot10^{-7}Q^2 + 1{,}189\cdot10^{-4}Q + 2{,}274\cdot10^{-3})T_{ос}^2 +$$
$$+ (-1{,}706\cdot10^{-5}Q^2 + 9{,}369\cdot10^{-3}Q + 0{,}01598)\,T_{ос} + (-2{,}542\cdot10^{-4}Q^2 + 0{,}3818Q + 76{,}87).$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Полученная зависимость позволяет вычислить значение потребления мощности аппаратом воздушного охлаждения в конкретный момент времени. Дополнительно проведен анализ чувствительности модели к входным данным. При проверке модели на основе тестовых значений по загрузке установки (расходу сырья) и изменения температуры окружающей среды для расчетного периода было выявлено, что при различных комбинациях погрешности в задании температуры окружающей среды на ±2 °С и/или расхода сырья на ±5 % изменение расчетного значения норматива потребляемой мощности составило до 1,5 %.

Полученное решение может являться основой (исходными данными) формирования базы статистических данных для определения норматива потребления электроэнергии и впоследствии использоваться для следующих целей:

• планирование объемов потребления электроэнергии и сокращение энергозатрат в планово-экономических процессах предприятий;

• выявление оборудования и узлов с повышенным потреблением электроэнергии с целью разработки планов по замене, реконструкции и модернизации установок;

• анализ затрат на электрическую энергию в рамках разработки графиков планово-предупредительных ремонтов и будущих программ по энергосбережению и повышению энергоэффективности;

• создание и внедрение на производственных объектах цифровых двойников, моделей прогнозирования потребления электроэнергии и мощности, систем управления энергией с интеграцией IoT-сенсоров и других интеллектуальных устройств.

Заключение

При ежегодно растущей потребности в электроэнергии для промышленных предприятий становится актуальным вопрос о сокращении расходов на электропотребление и, как следствие, внедрение энергосберегающих и повышающих энергоэффективность мероприятий. Однако разработка подобных мероприятий невозможна без точной оценки электропотребления различными типами оборудования, участвующего в производственном процессе.

В рамках данного исследования рассматривалось электропотребление аппаратами воздушного охлаждения на газоперерабатывающем предприятии. Была разработана методика, позволяющая с высокой точностью (среднеквадратичное отклонение расчетного и аппроксимирующего значений по итогам исследования не превышает 1 %) определить нормативное потребление электрической мощности аппаратом воздушного охлаждения в зависимости от двух изменяющихся факторов – температуры окружающей среды и загрузки установки переработки газа. По результатам исследования была определена формула расчета нормативного потребления электрической мощности для конкретного АВО на рассматриваемой установке.

Методика может быть использована сотрудниками газоперерабатывающих предприятий для определения нормативного потребления электроэнергии АВО при изменяющихся внешних и технологических факторах. Данная методика, разработанная и реализованная в программном комплексе Microsoft Office Excel, позволяет использовать ее административно-техническому и производственному персоналу без применения специализированного оборудования или ПО, что представляло бы собой трудоемкий процесс. В том числе возможно использование методики в программном обеспечении Р7-Офис для предприятий, перешедших на российский пакет офисных приложений.

Дальнейшее направление научно-исследовательской работы заключается в опробовании разработанной методики расчета на предприятиях переработки и/или транспортировки газа, а именно сравнение полученных нормативных значений с реальными статистическими данными, фиксируемыми на предприятии, проведение натурных измерений, оценка факторов, влияющих на потребление электроэнергии и степени их влияния.

К таким факторам могут быть отнесены следующие:

• географическое расположение и микроклимат объекта;

• физическое устаревание оборудования и моральный износ;

• отсутствие или наличие сезонного изменения углов атаки лопастей вентиляторов весной и осенью в связи с изменением плотности воздуха (поскольку регулировка дискретная, влияние

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

температуры на режим работы АВО компенсируется лишь частично, как следствие – неточное поддержание температуры газа и повышенные затраты на электроэнергию, так как включение вентиляторов АВО не приводит к требуемому снижению температуры газа, однако возможная экономия электрической энергии составляет до 10 %);

• нерегулярная или несвоевременная очистка оребренной поверхности теплообменных труб АВО (при низких температурах наружного воздуха на стенках труб теплообменных секций образуются гидраты, вследствие чего ухудшается эффективность охлаждения газа, возрастают потери давления в теплообменных секциях, происходит механическая деформация и разрушение труб теплообменных секций);

• конструктивные и эксплуатационные особенности АВО (подъем конструкций аппаратов над уровнем земли, использование теплообменных труб с максимальным коэффициентом оребрения или, например, применение композитных материалов в конструкции рабочих колес, что за счет более совершенной аэродинамической формы лопастей увеличит КПД вентиляторов и обеспечит возможность снижения электропотребления АВО до 40 %);

• метод включения вентиляторов (вентиляторы могут быть загружены по-разному в зависимости от метода включения – параллельно, когда все вентиляторы включаются одновременно и работают одинаково, или последовательно, когда сначала нагружается один вентилятор до 100 %, потом следующий и т.д.);

• регулирование расхода воздуха, степень загрузки двигателя (отсутствие регулирования, регулирование с помощью жалюзи или ЧРП, например снижение мощности привода, не предназначенного для работы в составе ЧРП, при частотном регулировании более чем на 30 % ведет к перегреву обмоток и снижению ресурса, при этом наличие ЧРП обеспечивает экономию электроэнергии до 20 %);

• качество исходных данных (помимо рабочей документации и паспортов оборудования требуется статистика потребления электроэнергии каждой единицей оборудования, установленной на объекте исследования) и др.

По результатам апробации методики на газоперерабатывающих предприятиях могут быть проведены исследования, направленные на разработку методов предиктивной аналитики для выявления признаков износа оборудования на ранней стадии, и разработаны мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, сокращению расходов на электроэнергию.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zhukovskiy Y.L., Batueva D.E., Buldysko A.D. et al.* Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 17. № 5268. DOI: 10.3390/en14175268

2. *Хасанов И.И., Ардуганов А.И.* Модернизация вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения на компрессорных станциях магистральных газопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 1-2. С. 29-34. DOI: 10.24412/0131-4270-2022-1-2-29-34

3. *Zhukovskiy Y., Koshenkova A., Vorobeva V. et al.* Assessment of the Impact of Technological Development and Scenario Forecasting of the Sustainable Development of the Fuel and Energy Complex // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 7. № 3185. DOI: 10.3390/en16073185

4. *Morenov V.* Advances in Oil and Gas Production: A Viewpoint // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 3. № 1379. DOI: 10.3390/en16031379

5. *Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Koshenkova A. et al.* A Methodology for Forecasting the KPIs of a Region's Development: Case of the Russian Arctic // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 15. № 6597. DOI: 10.3390/su16156597

6. *Токарев И.С.* Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 171-180.

7. *Senchilo N.D., Ustinov D.A.* Method for Determining the Optimal Capacity of Energy Storage Systems with a Long-Term Forecast of Power Consumption // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 21. № 7098. DOI: 10.3390/en14217098

8. *Токарев И.С., Югай В.Ф., Толмачев В.Н. и др.* Применение систем накопления электроэнергии в составе генерирующего оборудования систем электроснабжения производственных объектов ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2023. № S3 (853). С. 34-40.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

9. *Дубинина Н.А., Мичурина О.Ю., Кудрявцева О.В., Кушнер А.А.* Основные направления повышения энергоэффективности на предприятиях нефтегазовой отрасли // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 4 (38). С. 80-85. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-38-4-80-85

10. *Пронин В.А., Цветков В.А., Кованов А.В. и др.* Аналитический обзор способов регулирования производительности винтовых компрессоров // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2 (79). С. 28-38. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-28-38

11. *Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А.* Управление электроприводами установок охлаждения газа с учетом индивидуальных характеристик аппаратов воздушного охлаждения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 8. С. 567-571. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-8-567-568

12. *Yanvarev I.A., Vanyashov A.D., Krupnikov A.V.* Improving Gas Cooling Technology at its Compression in the Booster Compressor Station // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. P. 233-239. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.696

13. *Кудина Е.Ф., Приходько И.В., Карпенко В.В., Курицын П.А.* Влияние климатических факторов на работоспособность электрооборудования // Горная механика и машиностроение. 2021. № 2. С. 55-64.

14. *Ермишов К.В., Жаров А.Ю., Копычева У.Н.* Внедрение цифровых моделей для повышения эффективности процессов газоперерабатывающих предприятий: моделирование блока АВО // НефтеГазоХимия. 2021. № 3-4. С. 60-62. DOI: 10.24412/2310-8266-2021-3-4-60-62

15. *Хворов Г.А., Юмашев М.В.* Анализ энергосберегающих технологий охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО «Газпром» // Территория «Нефтегаз». 2016. № 9. С. 127-132.

16. *Арсланова А.Ф., Фарухшина Р.Р.* Оценка тепловой эффективности аппаратов воздушного охлаждения газа типа «Айсберг» // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 2. С. 59-65. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-2-59-65

17. *Калинин А.Ф., Меркурьева Ю.С., Халлыев Н.Х.* Оценка эффективности эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения газа нового поколения // Территория «Нефтегаз». 2018. № 9. С. 74-80.

18. *Еременко О.В.* К вопросу об эффективности инноваций в отдельных секторах деятельности нефтегазодобывающих предприятий с точки зрения влияния на себестоимость продукции // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2018. Вып. 1. С. 33-43. DOI: 10.18101/2304-4446-2018-1-33-43

19. *Shoghl S.N., Pazuki G.* Compressor/pump stations in natural gas transmission pipelines // Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Elsevier, 2024. Vol. 6: Natural Gas Transportation and Storage. P. 177-236. DOI: 10.1016/B978-0-443-19225-8.00006-8

20. *Jiawei Zhang, Lin Li, Qizhi Zhang, Yanbin Wu.* Optimization of Load Sharing in Compressor Station Based on Improved Salp Swarm Algorithm // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 15. № 5720. DOI: 10.3390/en15155720

21. *Масков Л.Р., Корнилов В.Ю.* Разработка модели электротехнического комплекса для аппаратов воздушного охлаждения газа газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной системой электроснабжения в программе MATLAB/SIMULINK // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 2. С. 50-71. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-50-71

22. *Knebel F.P., Trevisan R., do Nascimento G.S. et al.* A study on cloud and edge computing for the implementation of digital twins in the Oil & Gas industries // Computers & Industrial Engineering. 2023. Vol. 182. № 109363. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109363

23. *Egbumokei P.I., Dienagha I.N., Digitemie W.N. et al.* The role of digital transformation in enhancing sustainability in oil and gas business operations // International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation. 2024. Vol. 5. Iss. 5. P. 1029-1041. DOI: 10.54660/.IJMRGE.2024.5.5.1029-1041

24. *Семенов П.В., Семишкур Р.П., Дяченко И.А.* Концептуальная модель реализации технологии «цифровых двойников» для предприятий нефтегазового комплекса // Газовая промышленность. 2019. № 7 (787). С. 24-30.

25. *Yun J., Kim S., Kim J.* Digital Twin Technology in the Gas Industry: A Comparative Simulation Study // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 14. № 5864. DOI: 10.3390/su16145864

26. *Абакумов А.М., Антропов В.Е., Ведерников А.С., Абакумов О.А.* Энергетическая эффективность установок охлаждения природного газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 3 (63). С. 94-104.

27. *Калинин А.Ф., Меркурьева Ю.С., Фомин А.В.* Оценка эффективности использования частотно-регулируемого электропривода аппаратов воздушного охлаждения газа на линейных компрессорных станциях магистральных газопроводов // Территория «Нефтегаз». 2019. № 11. С. 68-75.

28. *Enbin Liu, Liuxin Lv, Yang Yi, Ping Xie.* Research on the Steady Operation Optimization Model of Natural Gas Pipeline Considering the Combined Operation of Air Coolers and Compressors // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 83251-83265. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924515

29. *Angjun Xie, Gang Xu, Chunming Nie et al.* Operation Data Analysis and Performance Optimization of the Air-Cooled System in a Coal-Fired Power Plant Based on Machine Learning Algorithms // Energies. 2024. Vol. 17. Iss. 22. № 5571. DOI: 10.3390/en17225571

30. *Mehrpooya M., Ghorbani B., Mousavi S.A., Zaitsev A.* Proposal and assessment of a new integrated liquefied natural gas generation process with auto-Cascade refrigeration (exergy and economic analyses) // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. Vol. 40. № 100728. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100728

31. *Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D. et al.* Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8919. DOI: 10.3390/en15238919

32. *Бабанова И.С., Прохорова В.Б., Токарев И.С.* Управление электропотреблением предприятий нефтегазового комплекса с учетом диагностических оценок технического состояния потребителей-регуляторов. М.: Горная книга, 2022. 372 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

33. *Шалыгин А.В., Фетисов В.Г., Карякина И.В.* Исследование работы аппарата воздушного охлаждения в системе магистрального газопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 2. С. 29-32. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-2-29-32

34. *Fahmy M.F.M., Nabih H.I.* Impact of ambient air temperature and heat load variation on the performance of air-cooled heat exchangers in propane cycles in LNG plants – Analytical approach // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 121. P. 22-35. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.05.013

35. *Lei Chen, Lijun Yang, Xiaoze Du, Yongping Yang.* A novel layout of air-cooled condensers to improve thermo-flow performances // Applied Energy. 2016. Vol. 165. P. 244-259. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.062

36. *Yonghong Guo, Tongrui Cheng, Xiaoze Du, Lijun Yang.* Anti-Freezing Mechanism Analysis of a Finned Flat Tube in an Air-Cooled Condenser // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 11. № 1872. DOI: 10.3390/en10111872

37. *Нелюбин А.П., Подиновский В.В.* Аппроксимация таблично заданных функций: многокритериальный подход // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2023. Т. 63. № 5. С. 717-730. DOI: 10.31857/S0044466923050174

38. *Силкина Т.С., Лямина Н.Ф.* Повышение энергоэффективности аппарата воздушного охлаждения при утилизации попутного нефтяного газа на нефтяных месторождениях // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 1. С. 51-58. DOI: 10.24143/1812-9498-2023-1-51-58

39. *Арабов М.Ш., Арабов С.М.* Энергоэффективность технологических процессов на Астраханском газоперерабатывающем заводе // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2023. № 3 (135). С. 10-19. DOI: 10.33285/1999-6934-2023-3(135)-10-19

40. *Арабов М.Ш., Гамзатова А.Г., Арабова З.М., Арабов С.М.* Эффективность трубчатой печи в процессе стабилизации углеводородного конденсата на Астраханском газоперерабатывающем заводе // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 4. С. 62-69. DOI: 10.24143/1812-9498-2023-4-62-69

Автор **Дарья Евгеньевна Филимошина,** *канд. техн. наук, ведущий специалист* (*ООО «ГЦЭ-энерго», Санкт-Петербург, Россия*), *dariabatueva418@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6945-2270*.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0