

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ЦОД ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. В.М. УЛЯШЕВА¹⁾,

канд. техн. наук, доц. А.Ю. МАРТЬЯНОВА²⁾, К.В. РЕЗНИК³⁾

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

¹⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5456-9532>,

²⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-2957>,

³⁾ ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3110-6833>

Надежность системы газоснабжения объектов различного назначения существенно зависит от надежного функционирования всех элементов газораспределительных агрегатов, размещенных в газораспределительных станциях (ГРС), предназначенных в первую очередь для снижения давления (редуцирования) до требуемой величины в зависимости от назначения ГРС. Редуцирование требует значительных затрат энергии, в том числе тепловой, на подогрев газа. В настоящее время требуются значительные вычислительные ресурсы, для чего используются центры обработки данных (ЦОД), или дата-центры, которые являются мощными источниками тепловых выбросов в атмосферу. Результаты численного моделирования теплового режима ЦОД подтверждают высокие значения температуры воздуха в помещениях. Известны различные варианты использования сбросной теплоты ЦОД. В данной работе предлагается утилизация теплоты ЦОД для использования в технологическом процессе ГРС с использованием детандер-генераторных агрегатов.

Ключевые слова: газоснабжение, газораспределительная станция (ГРС), центр обработки данных (ЦОД), утилизация теплоты, детандер-генераторный агрегат (ДГА), турбодетандер.

Введение. Активный рост внутреннего рынка потребления природного газа¹, продолжение, несмотря на смену geopolитической реальности, следования отечественных корпораций принципам устойчивого развития (ESG)², в том числе – игроков газового рынка, создают благоприятные условия для внедрения энергосберегающих технологий на объектах газоснабжения. Развитие информационного сектора экономики, в частности рост мощностей и площадей центров обработки данных (ЦОД), или дата-центров³, обладающих энергоёмким основным (вычислительным, коммуникационным) оборудованием и вспомогательным (климатическим и холодильным) для своих нужд, требуют всё большие объемы электроэнергии. По оценкам сетевых компаний в настоящее время потребление электроэнергии объектами ЦОД превышает 3,5 ГВт⁴. При этом потенциал энергосбережения составляет 2.1×10^6 МВт · ч/год, а к 2030 г. может увеличиться до 6.3×10^6 МВт [1]. Расчет теплопоступлений от оборудования ЦОД основан на рекомендациях, представленных в [2]. По результатам расчетов теплонапряженность машинных залов составляет порядка 50 Вт/м³ или 3 кВт/м², что соизмеримо с тепловыми нагрузками горячих цехов промышленных объектов. Значительное количество теплоты поступает от различных систем охлаждения оборудования ЦОД, что способствует повышению теплового загрязнения атмосферы.

Актуальность разработки энергосберегающих технологий для использования теплового потенциала ЦОД обоснована многими авторами [1; 3–5]. Среди предлагаемых технологий отмечены ограниченные возможности внутреннего использования сбросной теплоты ЦОД, в основном для подогрева приточного воздуха с использованием различных утилизаторов теплоты. Широко распространено внешнее применение для систем теплоснабжения с использованием тепловых насосов. Среди возможных направлений также отмечены сушка биомассы, предварительный подогрев воды при производстве энергии, в опреснительных установках, использование при производстве электроэнергии.

В последнее время стали широко использоваться детандерные агрегаты для производства электроэнергии [6; 7]. В данной работе предлагается решение, позволяющее соблюсти требования экологической повестки и обеспечить стабильный рост и развитие для обозначенных сфер экономики, в виде размещения машинных залов ЦОД вблизи объектов газотранспортных магистралей, в частности, газораспределительных станций (ГРС), оборудованных детандерными агрегатами.

¹ Корпоративный журнал ПАО «Газпром». – 2024. – № 4. – С. 11–15. URL: https://www.gazprom.ru/f/posts/58/270952/gazprom_04_2024_s.pdf (дата обращения 20.04.2025).

² «Газпром» инвестирует в устойчивость. URL: <https://www.rbc.ru/industries/news/651fbcc19a7947008ce7b99a> (дата обращения 20.04.2025).

³ BusinesStat: Анализ рынка коммерческих дата-центров в России в 2018–2022 гг., прогноз на 2023–2027 гг. в условиях санкций. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14188/> (дата обращения 20.04.2025).

⁴ Киловатт палата. Как меняется потребность ЦОДов в электроэнергии с развитием ИИ. URL: <https://www.komersant.ru/doc/8043060> (дата обращения 20.10.2025).

Методы и материалы. Структура машинных залов ЦОД представляет из себя чередование рядов, состоящих из стоек вычислительного оборудования, и «горячих» и «холодных» коридоров (рисунок 1).

Тепловой баланс данных центров практически не зависит от периода года, поскольку из-за отсутствия световых проемов исключается действие теплоты от солнечной радиации. При определении холодопроизводительности систем кондиционирования воздуха (СКВ) учитываются теплопоступления от серверного оборудования в стойках ($Q_{\text{ит}}$), источников бесперебойного питания (ИБП, $Q_{\text{ИБП}}$), элементов системы распределения электроэнергии ($Q_{\text{РП}}$), осветительных приборов ($Q_{\text{осв}}$), обслуживающего персонала ($Q_{\text{люд}}$), а также теплоты, поступающей с наружным воздухом в теплый период года ($Q_{\text{нап}}$) [8].

В большинстве случаев в технической документации на серверное оборудование представлена полезная выходная электрическая мощность без учета потерь электроэнергии. Для определения потерь и более достоверной информации о потребляемой электроэнергии оборудованием в машинном зале можно воспользоваться следующей формулой:

$$Q_{\text{с.о.}} = E_{\text{с.о.}} = 100 \cdot E_{\text{вых.с.о.}} \cdot N_{\text{б.п.}} \cdot \eta_{\text{б.п.}}^{-1}, \text{ Вт,} \quad (1)$$

где $Q_{\text{с.о.}}$ – теплопоступления от серверного оборудования, Вт;

$E_{\text{с.о.}}$ – потребляемая электрическая мощность серверного оборудования, Вт;

$E_{\text{вых.с.о.}}$ – полезная выходная мощность или паспортная мощность блоков питания серверного оборудования, Вт;

$N_{\text{б.п.}}$ – количество основных блоков питания серверного оборудования в соответствии с паспортной схемой резервирования, шт;

$\eta_{\text{б.п.}}^{-1}$ – эффективность одного блока питания, %.

Теплопоступления от ИБП:

$$Q_{\text{ИБП}} = 0,04 \cdot E_{\text{н}} + 0,06 \cdot E_{\text{с.о.}}, \text{ Вт,} \quad (2)$$

где $E_{\text{н}}$ – потребляемая ИБП мощность, Вт.

Тепловыделения от устройств распределения питания:

$$Q_{\text{РП}} = 0,02 \cdot E_{\text{н}} + 0,02 \cdot E_{\text{с.о.}}, \text{ Вт,} \quad (3)$$

где $E_{\text{н}}$ – номинальное значение энергосистем, иначе потребляемая устройствами распределения питания мощность), Вт.

В результате суммарные теплопоступления в помещениях данных центров определяются по формуле:

$$Q_{\text{ЦОД}} = Q_{\text{осв}} + Q_{\text{люд}} + Q_{\text{нап}} + Q_{\text{с.о.}} + Q_{\text{ИБП}} + Q_{\text{РП}}, \text{ Вт,} \quad (4)$$

где $Q_{\text{осв}}$ – теплопоступления от источников искусственного освещения, Вт;

$Q_{\text{люд}}, Q_{\text{нап}}$ – поступления теплоты от людей и через наружные ограждающие конструкции, Вт. Для данного объекта рассмотрен рабочий автоматический режим без обслуживания, помещение располагается на первом этаже и не имеет наружных ограждающих конструкций.

Результаты расчета теплового баланса для приведенного выше машинного зала представлены в таблице 1. Согласно методике [8] требуемая холодопроизводительность СКВ для подбора прецизионных кондиционеров принимается равной суммарным теплопоступлениям в помещения ЦОД с учетом рекомендуемого запаса 20% и коэффициента неравномерности загрузки серверного оборудования, который принимается равным 0,8 [8].

Таблица 1. – Тепловой баланс машинного зала ЦОД

Наименование помещения	Объем помещения, м ³	От искусств. освещения, Вт	От оборудования, Вт	Избытки теплоты (явные)	
				Вт	Вт/м ³
РТП-1 1-ый этаж	4750,8	1624	68075	69669	14,7

Для обеспечения нормируемых параметров (температура 10–35°C) подобраны 7 прецизионных кондиционеров DP-UPC140BUI-SX/XZ/QS/TS-D/F с выносным конденсатором фирмы Dantex, производительностью 14,7 кВт с расходом воздуха 3300 м³/ч.

Для оценки эффективности подобранных оборудования и схемы размещения серверных стоек в программе STAR-CCM+ выполнено численное моделирование. При создании геометрической модели учтены прецизионные кондиционеры, решетки для подачи охлажденного воздуха, размещение серверных стоек по принципу горячих и холодных коридоров (рисунок 1). Охлажденный воздух подается снизу через фальшпол. Численное моделирование теплового и воздушного режима помещения ЦОД основано на применении уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса [9]. Для расчета использована модель турбулентности k-e [10]. Некоторые результаты расчета представлены на рисунке 2.

В соответствии с руководством⁵ температура соответствует диапазону допустимых значений (10 до 35 °C), среднее значение по объему составляет 29 °C. Температура в пространстве фальшпола составляет 19±1 °C, что соответствует требованиям⁶.

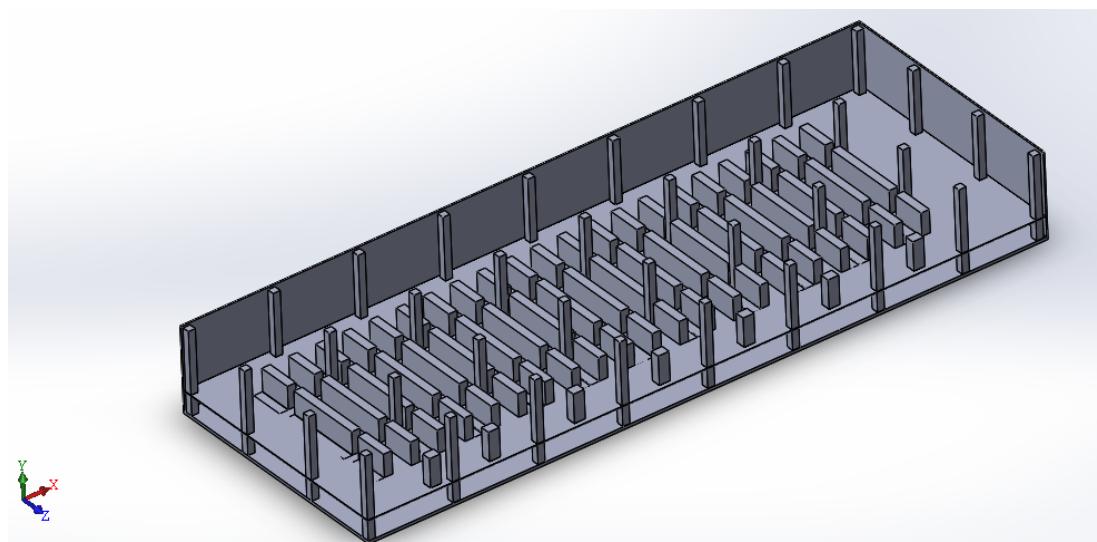


Рисунок 1. – Геометрическая модель помещения ЦОД

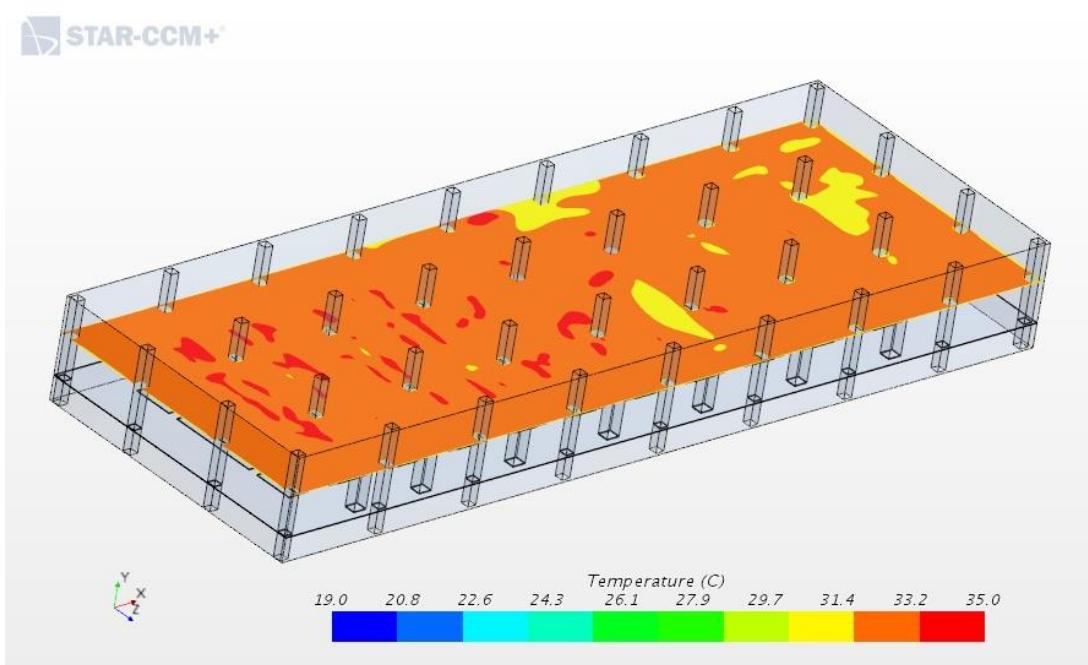


Рисунок 2. – Распределение температуры воздуха на уровне 1,500 м

⁵ ASHRAE TC 9.9. Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices URL: https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Bookstore/ASHRAE_TC0909_Power_White_Paper_22_June_2016_REVISED.pdf.

⁶ СТО НОСТРОЙ 2.15.177-2015. Инженерные сети зданий и сооружений внутренние. Устройство систем вентиляции и кондиционирования серверных помещений. Правила, контроль выполнения, требования к результатам работ. URL: https://profstroigroup.ru/uploads/files/STO/STO%202019/131-140/133_sto_nostroj_2_15_177-2015.pdf.

При определении тепловых нагрузок ЦОД, которые требуется отводить системами кондиционирования воздуха в паре с оборудованием возводимых вблизи с ЦОД объектами газораспределительных станций (ГРС), а именно: детандер-генераторными агрегатами, остается актуальным вопрос регулирования работы этой парной системы в условиях изменения мощностей ЦОД.

В предложенной парной системе (ЦОД + ГРС (рисунок 3) при выборе устройства для редуцирования давления газа на ГРС до заданных значений выбор между детандером и турбодетандером отдается турбодетандеру, включающему турбинный механизм и получившему большее применение, чем детандер с поршневым механизмом⁷. При применении детандер-генераторного агрегата (ДГА) в составе ГРС в качестве рабочего тела выступает природный газ.

Основными составными частями ДГА являются следующие технологические устройства: турбодетандер, генератор электроэнергии, теплообменник подогрева газа (в зависимости от применяемых схем: до/после, после детандера, последовательное чередование устройств), запорная и регулирующая арматура на газовых трубах, приборы автоматики и контрольно-измерительные приборы.

Принцип работы ДГА состоит в следующем (рисунок 4): транспортируемый в газопроводе 1 природный газ (либо его часть – при условии, когда ДГА служит дополнительным, резервным к основному дросселирующему устройству ГРС 2) подается в теплообменник предварительного подогрева 6 (при условии его применения в схеме и необходимости в подогреве газа перед ДГА), после газ подается на турбодетандер 10.

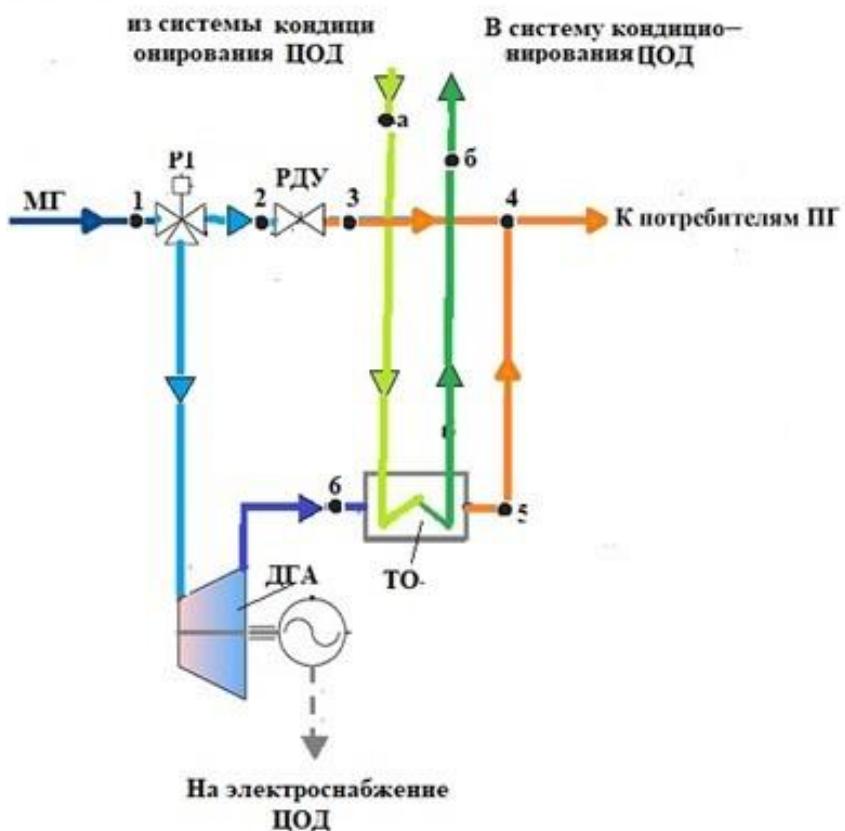
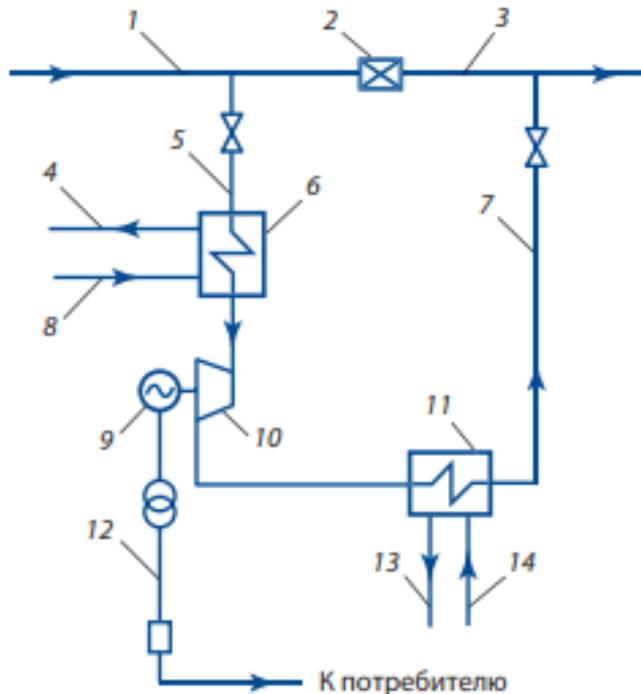


Рисунок 3. – Модель ГРС+ЦОД

Принцип работы турбодетандера аналогичен принципу действия газовой, либо паровой турбины. В турбодетандере энергия транспортируемого природного газа без сжигания органических видов топлива (т.е. экологически чистым способом) преобразуется в механическую энергию вращения ротора турбины. Результатом прохождения газа через лопатки турбины турбодетандера служит понижение его давления до заданных параметров и в качестве побочного продукта данного технологического процесса происходит понижение температуры транспортируемого природного газа.

⁷ Давыдов О.А. Методика оценки эффективности системы энергоснабжения газораспределительной станции с использованием возобновляемых видов энергии // дис. ... канд. техн. наук: 2.4.5. – СПБПУ Петра Великого, 2024. – 178 л. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/r25-66.pdf/download/r25-66.pdf>.



1 – газопровод высокого давления; 2 – стационарное дросселирующее устройство (при условии, когда ДГА служит дополнительным, резервным оборудованием); 3 – газопровод низкого давления; 4, 6, 8 – узел предподогрева газа перед турбодетандером (при наличии); 5 – газопровод подвода газа к турбодетандеру; 7 – газопровод отвода газа низкого давления от турбодетандера; 9 – электрогенератор, спаренный с турбодетандером; 10 – турбодетандер; 11, 13, 14 – подогрев газа после турбодетандера (utiлизации холода); 12 – линия подачи электроэнергии потребителю, выработанной на электрогенераторе

Рисунок 4. – Принципиальная схема применения ДГА в составе оборудования ГРС

Полученный в турбодетандере холод является вторичным энергетическим ресурсом (ВЭР), требующим утилизации. Выработанная турбиной механическая энергия передается по физически связанному с ней ротору на электрогенератор 9. Ток, вызываемый генератором, передается потребителю по сети 12. В теплообменнике 11 происходит подогрев природного газа после его расширения до требуемой по техническим условиям температуры. После турбодетандера 10 и следующего за ним теплообменника 11 газ передается по газопроводу 7 в газопровод низкого давления 3 и поставляется конечному потребителю.

Альтернативным рабочим телом для турбодетандера может служить воздух, чье давление предварительно повышается с помощью компрессоров. Суть применения турбодетандера в составе вентиляционных установок заключается в возможности получения охлажденного воздуха для промышленных объектов без использования холодильного оборудования с хладагентами. В данном случае для воздушно-холодильной установки (ВХУ), аналогично рассмотренной схеме на ГРС, предпочтение отдается турбодетандеру.

Данное техническое решение обладает рядом преимуществ:

1) воздух, используемый в качестве рабочего тела, не требует дополнительных затрат на приобретение в отличие от хладагента для холодильного оборудования. Используется либо атмосферный воздух для воздушно-холодильной установки, либо подается через вентиляционные сети объекта;

2) в сравнении с системами охлаждения воздуха, использующими аммиак, широко применяемыми на промышленных объектах, у рассматриваемого решения существенно снижены риски несчастных случаев на производстве в результате аварии в системе охлаждения;

3) воздушно-холодильные установки могут быть свободно размещены в практически любой точке промышленного предприятия, без обустройства дополнительных специальных коммуникаций (помимо места забора/подачи воздуха);

4) капиталовложения в подобную систему ниже, чем в системы специального холодильного оборудования.

Заключение. При использовании парной системы ЦОД+ГРС имеет место утилизация холода, как вторичного энергетического ресурса от установок ДГА, что способствует закрытию потребности в холоде объектов ЦОД. На функционирование внутренних климатических систем ЦОД может уходить до 35% от общего потребления электроэнергии. Учитывая, что на работу основного вычислительного оборудования центров уходит до 50% энергопотребления, доля потребления электроэнергии для обеспечения микроклимата центров занимает весомую часть в общем потреблении электроэнергии.

Возведение и эксплуатация парной системы из объектов ЦОД и ГРС является взаимовыгодным решением для обеих отраслей экономики. Отрасль газоснабжения получает возможность широкого внедрения экологического решения на объектах ГРС, решая вопрос с утилизацией вторичного холода от установок ДГА. Сектор цифровой экономики получает существенную экономию на климатическом оборудовании вычислительных центров, поддержку роста рынка ЦОДов и возможности для большего масштабирования своих проектов.

ЛИТЕРАТУРА

- Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. Эффективность применения сбросного тепла центров обработки данных // Теплоэнергетика. – 2023. – № 10. – С. 55–64.
- Quirk D., Davidson T., Schmidt R. Руководство по тепловому режиму в центрах обработки данных // АВОК. – 2022. – № 7. – С. 52–56.
- Утилизация теплоты центров обработки данных с использованием тепловых насосов / М.Ю. Егоров, Э.С. Жиляев, А.О. Кривицкий и др. // СОК. – 2025. – № 9. – С. 38–44.
- Смолкс М. Повторное использование тепла ЦОДов // ИКС. – 2024. – № 2. – С. 44–51.
- Dmitriev Y. Analysis of cooling system efficiency // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, № 4. – P. 49–59.
- Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 961–968.
- Эффективность работы детандер-генераторных агрегатов с предварительным нагревом газа / Э.К. Кан, А.А. Мукольянц, Б.Б. Норматов и др. // UNIVERSUM. Технические науки: электрон. научн. журн. – 2024. – № 11(128). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18693>.
- Чернов А.Н., Агапитов Е.Б. Методика размещения кондиционеров в центрах обработки данных для обеспечения эффективного охлаждения ИТ-оборудования // Научный вестник ВГАСУ. – 2013. – № 4(32). – С. 41–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20789031&ysclid=mivxqfx9ig806370549> (дата обращения 20.10.2025).
- Численное моделирование теплопередачи теплообменника в серверном оборудовании / Н.С. Пономарев, Ю.А. Дмитриев, В.К. Аверьянов и др. // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – С. 29–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.03.29-33.
- Averyanov V., Vasiliev V., Ulyasheva V. Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat-, air- and mass exchange processes // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 44. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400005.

REFERENCES

- Yakovlev, I.V., & Avdokunin, N.V. (2023). E`ffektivnost` primeneniya sbrosnogo tepla centrov obrabotki danny`x [The Effectiveness of Using Data Center Waste Heat]. *Teploe`nergetika [Thermal Power Engineering]*, (10), 55–64. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Quirk, D., Davidson, T. & Schmidt, R. (2022). Rukovodstvo po teplovomu rezhimu v centrax obrabotki danny` [Guide to Thermal Conditions in Data Centers]. *ABOK [AVOK]*, (7), 52–56. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Egorov, M.Yu., Zhilyaev, E.S., Krivitsky, A.O., Demidova, N.B., Kovalenko, I.I., Proshkin, S.S., ... Shcherbatov, I.A. (2025). Utilizaciya teploty` centrov obrabotki danny`x s ispol`zovaniem teplovoy`x nasosov [Utilization of the heat of data processing centers using heat pumps]. *SOK [SOK]*, (9), 38-44. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Smolks, M. (2024). Povtornoje ispol`zovanie tepla CzODov [Reusing Data Center Heat]. *IKS [IKS]*, (2), 44–51. (In Russ.).
- Dmitriev, Y. (2022). Analysis of cooling system efficiency. *Architecture and Engineering*, 7(4), 49–59.
- Klimenko, A.V., Agababov, V.S., Borisova, P.N., & Petin, S.N. (2017). Termodinamicheskaya e`ffektivnost` ispol`zovaniya detander-generatorny`x agregatov na stanciyakh texnologicheskogo umen`sheniya davleniya transportiruemogo prirodnogo gaza [Thermodynamic efficiency of using expander-generator units at stations for technological pressure reduction of transported natural gas]. *Teplofizika i ae`romexanika [Thermal Physics and Aeromechanics]*, 24(6), 961–968. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Kan, E.K., Mukol`yancz, A.A., Normatov, B.B., & Abduraimov, A.S. (2024). E`ffektivnost` raboty` detander-generatorny`x agregatov s predvaritel`ny`m nagrevom gaza [Efficiency of gas-preheated expander-generator units]. *UNIVERSUM. Texnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. [UNIVERSUM. Technical sciences: electron. scientific journal]*, 11(128). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18693>. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Chernov, A.N., & Agapitov, E.B. (2013). Metodika razmeshheniya kondicionerov v uentrax obrabotki danny`x dlya obespecheniya e`ffektivnogo oxlazhdeniya IT-oborudovaniya [Methodology for placing air conditioners in data processing centers to ensure efficient cooling of IT equipment]. *Nauchny`j vestnik VGASU [Scientific Bulletin of VGASU]*, (4), 41–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20789031&ysclid=mivxqfx9ig806370549>. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Ponomarev, N.S., Dmitriev, Y.A., Aver`yanov, V.K., & Tsygankov, A.V. (2024). Chislennoe modelirovanie teploperedachi teploobmennika v servernom oborudovanii [Numerical modeling of heat transfer in a heat exchanger in server equipment]. *Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo [Industrial and civil engineering]*, (3), 29–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.03.29-33. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Averyanov, V., Vasiliev, V., & Ulyasheva, V. (2018). Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat-, air- and mass exchange processes. *E3S Web of Conferences*, 44. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400005.

Поступила 15.12.2025

UTILIZATION OF DATA CENTER HEAT FOR GAS SUPPLY FACILITIES

V. ULYASHEVA, A. MARTYANOVA, K. REZNIK
(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering)

The reliability of the gas supply system for various types of facilities depends significantly on the reliable operation of all elements of the gas distribution units located in gas distribution stations (GDS), which are primarily designed to reduce the pressure (reduction) to the required level, depending on the purpose of the GDS. Reduction requires significant energy consumption, including the use of thermal energy to heat the gas. Currently, significant computational resources are required, which are provided by data processing centers (DPCs) or data centers, which are significant sources of thermal emissions into the atmosphere. The results of numerical modeling of the data center's thermal regime confirm the high values of indoor air temperature. Various options for using the data center's waste heat are known. This paper proposes the utilization of the data center's heat for use in the GDS process using expander-generator units.

Keywords: *gas supply, gas distribution station (GDS), data processing center (DPC), heat recovery, expander-generator unit (EGU), turboexpander.*