



Gaz turbina qurilmalarining kirish qismida havoni sovutishning zamonaviy usullari

Sevinar B. Nematova¹, Erkin K. Matjanov^{2,a}

¹ Xalqaro hamkorlik bo'limi mutaxassisi, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; nematovasevinar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4558-8856>

^{2,a} PhD, dots, Konstruktorlik byurosi va tajriba ishlab chiqarish ilmiy-texnika markazi ilmiy-texnik innovatsiyalar bo'yicha direktor muovini., O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, Toshkent, 100047, O'zbekiston e.matjanov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-3727-3251>

Dolzarbli: atrof-muhit haroratining oshishi gaz turbinali qurilmalar (GTQ) kompressoriga kiruvchi havoning zichligini kamaytiradi, bu esa ularning quvvati va energiya samaradorligining pasayishiga olib keladi. Elektr energiyasiga bo'lgan talabning ortib borishi hamda energetik tizimlar samaradorligini oshirish zarurati sharoitida, ayniqsa kombinatsiyalangan siklli qurilmalar uchun, turbina kirishidagi havoni sovutish texnologiyalarini qo'llash dolzarb hisoblanadi.

Maqsad: gaz turbinali qurilmalar kirishidagi havoni sovutishning zamonaviy usullarini taqqoslash va ularning qurilma unumdorligi, energiya samaradorligi, suv sarfi hamda iqtisodiy ko'rsatkichlarga ta'sirini aniqlash..

Usullar: tadqiqotda kiruvchi havoni sovutish texnologiyalarining termodinamik va texnik-iqtisodiy tahlili o'tkazildi. Uchta asosiy usul ko'rib chiqildi: bug'lanish orqali sovutish, tumansimon purkash (yuqori bosim ostida suv purkash) va absorbsion sovutish. Suv sarfini baholash uchun massa saqlanish tenglamalari hamda sovutish tizimlari va gradirnyalar uchun suv sarfi hisoblari qo'llanildi.

Natijalar: tadqiqot natijalari kirish havosini sovutish tizimlari GTQ unumdorligi va energiya samaradorligini oshirishini ko'rsatdi. Bug'lanish orqali sovutish quvvatni 5–10% ga oshiradi va kapital xarajatlari nisbatan past, ammo uning samaradorligi havoning namligiga bog'liq. Tumansimon purkash usuli quvvatni 15–20% gacha oshiradi, biroq ko'proq suv sarfini va sifatli suv tayyorlash tizimini talab qiladi. Absorbsion chiller esa eng katta quvvat oshirishini (20–25% gacha) ta'minlaydi va turli iqlim sharoitlarida samarali ishlaydi, ammo katta kapital xarajatlari va murakkab infratuzilmani talab qiladi.

Kalit so'zlar: gaz turbinali qurilmalar, kombinatsiyalangan sikllar, havoni sovutish, bug'lanish orqali sovutish, tumansimon purkash, absorbsion chiller, energiya samaradorligi, suv iste'moli, texnik-iqtisodiy tahlil, termodinamika.

Современные методы охлаждения воздуха на входе в ГТУ

Севи́нар Б. Нема́това¹, Эрки́н К. Матжа́нов^{2, a}

For citation: Nematova S.B., Matjanov E.K. Modern Methods of Inlet Air Cooling for Gas Turbine Units. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 162-171.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21205860>

Received: 12.12.2025

Revised: 12.02.2026

Accepted: 11.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Sevinar B. Nematova, Erkin K. Matjanov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

¹⁾ Специалист отдела международного сотрудничества, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; nematovasevinar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4558-8856>

^{2,a)} Заместитель директора по научно-техническим инновациям Конструкторского бюро и опытного производства Научно-технического центра Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100047, Узбекистан; e.matjanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3727-3251>

Актуальность: повышение температуры окружающей среды снижает плотность воздуха на входе компрессора газотурбинных установок (ГТУ), что приводит к уменьшению их мощности и энергоэффективности. В условиях растущего спроса на электроэнергию и необходимости повышения эффективности энергетических систем актуальным становится применение технологий охлаждения воздуха на входе ГТУ, особенно для установок комбинированного цикла.

Цель: провести сравнительный анализ современных методов охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок и определить их влияние на производительность, энергоэффективность, водопотребление и экономические показатели работы энергетических установок.

Методы: использован термодинамический и технико-экономический анализ различных технологий охлаждения приточного воздуха. Рассмотрены три метода: испарительное охлаждение, туманообразование (впрыск воды под высоким давлением) и абсорбционное охлаждение. Для оценки водопотребления применены уравнения сохранения массы и расчёты расхода воды для систем охлаждения и градирен.

Результаты: установлено, что применение систем охлаждения воздуха повышает производительность и энергоэффективность ГТУ. Испарительное охлаждение увеличивает мощность на 5–10% и характеризуется низкими капитальными затратами, но зависит от влажности воздуха. Туманообразование обеспечивает прирост мощности до 15–20%, однако требует большего водопотребления и качественной водоподготовки. Абсорбционный чиллер демонстрирует наибольший прирост мощности (до 20–25%) и эффективен в различных климатических условиях, но требует значительных капитальных затрат и сложной инфраструктуры.

Ключевые слова: газотурбинные установки, комбинированные циклы, охлаждение воздуха, испарительное охлаждение, туманообразование, абсорбционный чиллер, энергоэффективность, водопотребление, технико-экономический анализ, термодинамика.



Modern Methods of Inlet Air Cooling for Gas Turbine Units

Sevinar B. Nematova¹, Erkin K. Matjanov^{2,a}

¹⁾ International Cooperation Specialist, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; nematovasevinar@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-4558-8856>

^{2,a)} PhD, Deputy Director for Scientific and Technical Innovations, Design Bureau and Experimental Production Scientific-Technical Center, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 100047, Uzbekistan; e.matjanov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3727-3251>

Relevance: an increase in ambient temperature reduces the air density at the compressor inlet of gas turbine units (GTUs), which leads to a decrease in their power output and energy efficiency. Under conditions of growing electricity demand and the need to improve the efficiency of energy systems, the application of inlet air cooling technologies for gas turbine units becomes particularly relevant, especially for combined cycle power plants.

Aim : to conduct a comparative analysis of modern inlet air cooling methods for gas turbine units and determine their impact on performance, energy efficiency, water consumption, and economic indicators of power plant operation.

Methods: thermodynamic and techno-economic analyses of various inlet air cooling technologies were applied. Three methods were considered: evaporative cooling, fogging (high-pressure water injection), and absorption cooling. To evaluate water consumption, mass balance equations and water flow calculations for cooling systems and cooling towers were used.

Results: the study showed that the use of inlet air cooling systems increases the performance and energy efficiency of gas turbine units. Evaporative cooling increases power output by 5–10% and is characterized by low capital costs, but its effectiveness depends on air humidity. Fogging provides a higher power increase of up to 15–20%, but requires higher water consumption and high-quality water treatment. The absorption chiller demonstrates the greatest increase in power output (up to 20–25%) and operates effectively under various climatic conditions; however, it requires significant capital investment and complex infrastructure.

Keywords: gas turbine units, combined cycles, air cooling, evaporative cooling, fogging, absorption chiller, energy efficiency, water consumption, techno-economic analysis, thermodynamics.

1. Введение (Introduction)

В условиях нарастающего глобального спроса на энергоресурсы, усугубляемого истощаемостью запасов ископаемых видов топлива, а также экологическими вызовами, связанными с антропогенными эмиссиями диоксида углерода и антропогенным изменением климата, наблюдается эскалация цен на энергоносители и обострение энергетических нужд. В этой связи приобретает первостепенную актуальность разработка инновационных методологий энергетической конверсии и генерации электричества, ориентированных на повышение эффективности. Особое внимание в энергетической отрасли привлекают комбинированные циклы электростанций на базе газотурбинных установок (ГТУ), которые играют важную роль в обеспечении стабильного энергоснабжения. Газотурбинные агрегаты применяются не только в электроэнергетике, но и в авиастроении, судостроении, а также в различных отраслях промышленности, включая нефтехимию и нефтепереработку. Учитывая их широкое распространение, оптимизация эксплуатационных характеристик ГТУ представляет собой приоритетную задачу.

Одним из фундаментальных ограничений в функционировании таких систем является снижение их КПД при повышенных температурах окружающей среды, что особенно проявляется в летний период. Рабочий процесс ГТУ основан на термодинамическом цикле Брайтона, где атмосферный воздух подвергается адиабатическому сжатию в компрессоре, последующему смешиванию с топливом и изохорному сгоранию, в результате чего образуются высокотемпературные продукты сгорания. Эти газы детандируют в турбине, генерируя механическую работу для производства электроэнергии. Ключевыми экзогенными факторами, детерминирующими производительность, выступают температура, давление и относительная влажность атмосферного воздуха. При росте температуры окружающей среды снижается плотность воздуха, что приводит к уменьшению массового расхода в компрессоре, ухудшению объёмного КПД и, как следствие, к падению номинальной мощности турбины. Кроме того, элевация температуры выпускаемого воздуха усиливает энергозатраты на компрессию, однако это не компенсируется эквивалентным приростом мощности на валу турбины, вызывая существенное снижение чистой выходной мощности и интегрального КПД системы.

Данная температурная зависимость усугубляется в конфигурациях комбинированных циклов, где газотурбинный и паротурбинный контуры функционируют в синергии. В таких установках отработанное тепло от ГТУ рекупируется для генерации пара, который приводит в действие паровую турбину, обеспечивая дополнительную выработку энергии. Хотя термический КПД подобных систем в идеальных условиях достигает 55–62%, в регионах с жарким и



влажным климатом он заметно деградирует вследствие ухудшения характеристик газотурбинного модуля. Следовательно, интеграция передовых технологий охлаждения выпускаемого воздуха для усиления операционной эффективности и устойчивости газотурбинных и комбинированных энергетических комплексов.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Система испарительного охлаждения среды - принцип функционирования системы охлаждения на основе испарительного теплоносителя сопоставим с механизмом действия водяных охладителей. В данной конфигурации насос обеспечивает подачу воды на поверхность испарительных элементов, где происходит её дисперсное распыление. При прохождении входного воздушного потока, направляемого в компрессор, через эти поверхности вода испаряется, поглощая латентную теплоту парообразования, что приводит к снижению температуры воздуха. Для предотвращения переувлажнения и поддержания стабильности работы системы в имитационных моделях задаётся верхний предел относительной влажности охлаждённого воздуха на уровне 90%, что соответствует общепринятым стандартам проектирования систем с испарительным охлаждением.

Таблица 1. Сравнение преимуществ и недостатков методов охлаждения приточного воздуха
Table 1. Comparison of the Advantages and Disadvantages of Inlet Air Cooling Methods

Технология	Испарительный охладитель среднего размера. Вода впрыскивается в поток входящего воздуха, что приводит к его охлаждению от температуры сухого термометра до значения, приближенного к температуре влажного термометра, за счёт испарительного поглощения теплоты.
Преимущества	Системы испарительного охлаждения входящего воздуха представляют собой эффективное решение для повышения производительности газотурбинных и комбинированных энергетических установок. Их преимущества включают низкие капитальные затраты благодаря простой и экономичной конструкции, высокую надёжность и удобство эксплуатации, а также отсутствие ограничений по продолжительности работы. Технология характеризуется минимальными энергозатратами вспомогательных систем, что снижает эксплуатационные расходы и упрощает обслуживание. Модульность конструкции обеспечивает быструю поставку и интеграцию оборудования. Совокупность этих факторов делает испарительное охлаждение оптимальным способом повышения эффективности и устойчивости энергетических установок, особенно в условиях жаркого климата.
Недостатки	Несмотря на эффективность систем испарительного охлаждения, их применение сопровождается ограничениями. Потенциал снижения температуры ограничен пределом по влажному термометру, что обуславливает умеренный прирост мощности. Существенным недостатком является значительный расход очищенной воды, требующей специальной подготовки и создающей дополнительные эксплуатационные и логистические сложности, особенно при дефиците водных ресурсов. Использование воды повышает риск накипобразования, что увеличивает потребность в обслуживании и усложняет водоподготовку. Кроме того, в условиях высокой относительной влажности прирост КПД и мощности оказывается ограниченным по сравнению с альтернативными технологиями охлаждения. Эти факторы требуют комплексной оценки климатических и экономических условий при выборе и эксплуатации испарительных систем.
Технология	Технология распыления под высоким давлением представляет собой метод испарительного охлаждения, при котором очищенная вода под высоким давлением преобразуется в мелкодисперсные капли и впрыскивается в воздухозаборные каналы газотурбинной установки. Этот процесс позволяет снизить температуру входящего воздуха до уровня, близкого к температуре влажного термометра, при достижении относительной влажности 100%. За счёт интенсивного испарения капель обеспечивается эффективное поглощение латентной теплоты, что способствует охлаждению воздуха и повышению массового расхода через компрессор, улучшая производительность турбины.
Преимущества	Системы распыления воды под высоким давлением для охлаждения входящего воздуха газотурбинных установок представляют собой эффективное и экономичное решение. Их преимущества заключаются в низких капитальных затратах за счёт простой конструкции и стандартизированных компонентов, а также в дополнительном охлаждающем эффекте за счёт испарения мелкодисперсных капель в компрессоре, что повышает мощность и снижает тепловую нагрузку на турбину. Системы обеспечивают непрерывное охлаждение без временных ограничений, отличаются низкими эксплуатационными расходами благодаря минимальному энергопотреблению и редкой необ-

	ходимости в обслуживании. Модульная архитектура упрощает доставку и установку оборудования, сокращая сроки ввода в эксплуатацию. Совокупность этих факторов делает технологию особенно перспективной для применения в жарком климате, где температурная чувствительность турбин наиболее критична.
Недостатки	Системы распыления воды под высоким давлением, применяемые для охлаждения входящего воздуха газотурбинных установок, наряду с преимуществами обладают рядом эксплуатационных ограничений. Их эффективность ограничена температурой по влажному термометру, что снижает прирост мощности, особенно в условиях высокой влажности. По сравнению с традиционными методами испарительного охлаждения такие системы характеризуются повышенным расходом деминерализованной воды, что увеличивает издержки и предъявляет дополнительные требования к логистике. Необходимость использования высококачественной очищенной воды усложняет водоподготовку и повышает затраты на эксплуатацию. Кроме того, прирост производительности остаётся ограниченным физическими пределами испарительного процесса, что снижает конкурентоспособность технологии в ряде климатических условий. Эти факторы требуют комплексного анализа климатических и экономических условий при выборе и эксплуатации систем распыления под высоким давлением.
Технология	Абсорбционное охлаждение представляет собой технологию, использующую избыточное тепло, генерируемое газотурбинной установкой (КТ), для привода холодильного цикла, обеспечивающего охлаждение входящего воздуха. В таких системах тепловая энергия, отводимая от газовой турбины, применяется для активации абсорбционного холодильного контура, чаще всего на основе пары бромистый литий–вода или аммиак–вода. Это позволяет эффективно снижать температуру воздуха на входе в компрессор, увеличивая его плотность и массовый расход, что, в свою очередь, повышает выходную мощность и КПД турбины. Данный подход отличается высокой энергоэффективностью, так как использует отработанное тепло, минимизируя потребность во внешних источниках энергии для охлаждения.
Преимущества	Абсорбционные системы охлаждения входящего воздуха представляют собой эффективное решение для повышения производительности газотурбинных установок. Их ключевым преимуществом является независимость от температуры по влажному термометру, что позволяет достигать более глубокого охлаждения и стабильной работы в различных климатических условиях. Использование рекуперированной тепловой энергии из градиен или других источников повышает общую энергоэффективность комплекса. Системы обеспечивают непрерывное охлаждение без временных ограничений и отличаются низкими затратами электроэнергии благодаря использованию теплового привода. По сравнению с испарительными и туманообразующими технологиями, абсорбционное охлаждение обеспечивает более значительный прирост КПД и мощности установки. Эти свойства делают технологию перспективной для эксплуатации в жарком климате и в условиях повышенных требований к эффективности энергетических систем.
Недостатки	Абсорбционные системы охлаждения, несмотря на высокую эффективность, имеют ряд существенных ограничений. Их внедрение требует значительных капитальных затрат из-за сложной конструкции и необходимости интеграции с теплообменным оборудованием. Эксплуатация сопровождается повышенными расходами, связанными с обслуживанием абсорбентов и теплообменных узлов, а также предъявляет высокие требования к квалификации персонала. Эффективность систем ограничивается конструктивными параметрами турбины, включая минимально допустимую температуру входящего воздуха. Дополнительно их применение возможно преимущественно в установках комбинированного цикла, так как технология опирается на использование избыточного тепла. По сравнению с альтернативными методами абсорбционное охлаждение требует большего отвода теплоты и увеличенного водопотребления для работы градиен. Кроме того, высокая сложность конструкции обуславливает длительные сроки поставки и монтажа. Эти факторы подчёркивают необходимость тщательного технико-экономического анализа и учёта климатических условий при выборе данной технологии для газотурбинных установок.

Система испарительного охлаждения с эффектом туманообразования - в данной системе очищенная вода подаётся через форсунки, которые трансформируют её в микро капли с диаметром, как правило, менее 40 мкм. Эти капли распыляются во входящий воздушный поток, обеспечивая интенсивный теплообмен между воздухом и водой за счёт увеличенной удельной поверхности контакта. В процессе испарения капель происходит поглощение латентной теплоты, что приводит к снижению температуры воздуха, поступающего в компрессор. В имитаци-

онной модели относительная влажность охлаждённого воздуха ограничена значением 95%, что оптимизирует эффективность испарения, предотвращая перенасыщение входящего потока и обеспечивая стабильность работы системы.

Система охлаждения абсорбционного chillera - абсорбционные системы охлаждения сконструированы таким образом, что хладагент, испаряясь, поглощает теплоту из окружающей среды, обеспечивая тем самым снижение температуры. Важно отметить, что такие системы преимущественно реализуются в двух конфигурациях: с использованием пары бромистый литий-вода, где бромистый литий выступает абсорбентом, и с применением аммиачно-водного раствора, где вода выполняет функцию абсорбента. Выбор рабочей жидкости и абсорбента определяется спецификой применения и эксплуатационными требованиями системы.

Анализ расходов воды. Для систем охлаждения расход воды можно определить с помощью следующего уравнения:

$$m_{\text{water}} = m_{\text{air}}(\omega_2 - \omega_1). \quad (1)$$

В представленном уравнении представляет собой массовый расход воздуха, поступающего в систему охлаждения, ω_1 обозначает коэффициент влажности на входе в систему охлаждения, ω_2 обозначает коэффициент влажности на выходе из системы охлаждения, указывает требуемый массовый расход воды.

Уравнения сохранения массы для смоченной области формулируются следующим образом:

$$m_{i,wa} = m_{eva} + m_{o,wa}; \quad (2)$$

$$m_{i,wa} = m_{o,wt}; \quad (3)$$

где $m_{i,wa}$ представляет собой массовый расход воды, поступающей в смоченную область (кг/с); m_{eva} , $m_{o,wa}$ - массовый расход испаряемой воды и массовый расход воды, выходящей из смоченной зоны, соответственно. Кроме того, скорость продувки смоченной зоны практически равна массовому расходу воды, выходящей из смоченной зоны, который принимается равным 10% от общего количества воды, поступающей в фильтры.

В резервуаре для воды расход воды можно определить с помощью следующего уравнения:

$$m_{o,wt} X_{o,wt} = m_{i,wt} X_{i,wt} + m_{o,wa} X_{o,wa}; \quad (4)$$

где $m_{o,wt}$ представляет собой массовый расход воды, выходящей из резервуара (кг/с), $m_{i,wt}$, $m_{o,wa}$ - массовый расход воды, поступающей в резервуар и массовый расход воды, выходящей из смоченной зоны, соответственно. Также X обозначает электропроводность воды. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) и определяется на основе свойств оборотной воды.

Для водоочистных сооружений расход воды можно определить с помощью уравнений:

$$m_{o,mw} = m_{o,wtp} X_{o,wtp} + m_{ww} X_{ww}; \quad (5)$$

$$m_{i,mw} = m_{o,wtp}; \quad (6)$$

где $m_{i,mw}$ представляет собой массовый расход воды, поступающей на водоочистную станцию (кг/с), $m_{o,wtp}$, m_{ww} - массовый расход воды, выходящей из водоочистной станции, и массовый расход сточных вод, выходящих из водоочистной станции, соответственно. Также X обозначает электропроводность воды. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) продувка с водоочистной станции составляет около 25% от расхода воды, поступающей на станцию.

В системе абсорбционного охлаждения, ввиду наличия градирни, расчёты, связанные с анализом её водопотребления, будут производиться согласно рис.1 следующим образом:

$$m_3 = m_{eva} + m_4; \quad (7)$$

$$m_1 = m_2 + m_3; \quad (8)$$

$$m_4 = 0.1 \times m_{eva}; \quad (9)$$

$$m_{eva} = \frac{m_{\text{охл.вода}} \times \Delta T \times C}{H_v}; \quad (10)$$

$$m_{\text{охл.вода}} = \rho_{\text{вода}} \times Q_{\text{охл.вода}}; \quad (11)$$

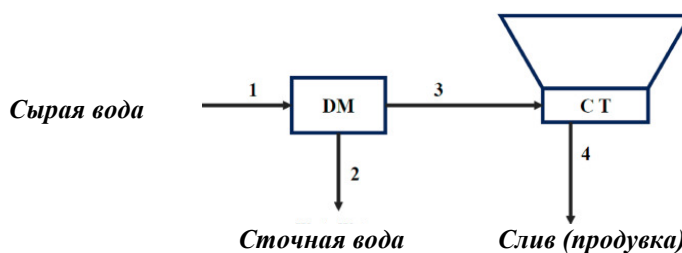


Рис.1. Абсорбционная градирня. DM-водоочиститель (деминерализация), СТ-градирня

Fig. 1. Absorption cooling tower. DM - water treatment unit (demineralization), СТ - cooling tower

Как показано на рис.1, уравнения сохранения массы для градирни и водоочистителя представлены: здесь m_3 представляет собой массовый расход деминерализованной воды, поступающей

ющей в градирню (кг/с), m_{Eva} обозначает массовый расход испарённой деминерализованной воды в градирне (кг/с), m_4 означает массовый расход воды, выходящей из градирни (кг/с) что скорость продувки предполагалась равной 10%; m_1 указывает массовый расход сырой воды, поступающей в очистителя (кг/с); m_2 соответствует массовому расходу сточных вод, выходящих из очистителя (кг/с), $m_{\text{охлаж. вода}}$ представляет собой массовый расход воды, циркулирующей в контуре конденсатора охладителя (кг/с), ΔT представляет собой разницу температур между входящей и выходящей водой ($^{\circ}\text{C}$), C - удельная теплоёмкость воды (кЖ/кг*К), H_v - скрытая теплота парообразования воды, циркулирующей в контуре конденсатора ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Согласно уравнениям (7) – (11,) и с учётом расчётов абсорбционной градирни, предполагая, что отходы очистных сооружений составляют 35 % поступающей воды, можно получить следующие результаты:

$$Q_1 = \frac{Q_3}{0,65}. \quad (12)$$

Таким образом, Q_3 представляет собой объёмный расход потребляемой деминерализованной воды ($\text{м}^3/\text{ч}$), тогда как Q_1 обозначает объёмный расход сырой воды, используемой в системе абсорбционного охлаждения ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Конфигурация режимов работы системы охлаждения в комбинированном цикле. На рис.2 представлен анализ основного цикла в сочетании с тремя различными сценариями, демонстрирующими различия в конфигурации оборудования и рабочих циклах для систем испарительного охлаждения, туманообразования и абсорбционного охлаждения. В контексте системы испарительного охлаждения для каждой пары газовых турбин предусматривается автономный испарительный модуль, ключевыми элементами которого являются целлюлозные испарительные прокладки, вентиляторы и насосы. Такая конструкция позволяет размещать модуль как до, так и после воздушных фильтров. В рамках данного исследования рассматривалась конфигурация с установкой испарительной системы перед воздушными фильтрами. Этот подход минимизирует риск проникновения капель воды в компрессор и турбину, а также способствует продлению срока службы воздушных фильтров за счёт предварительной очистки воздуха от частиц.

В отличие от традиционных систем испарительного охлаждения, система туманообразования, основанная на применении игольчатых сопел и насосов высокого давления, характеризуется уникальным механизмом формирования водяного аэрозоля. В данной конфигурации вода под высоким давлением вытекает из компактного гладкостенного канала и сталкивается с прецизионно расположенной иглой, трансформируясь в тонкий конический слой мельчайших капель. Эта конструктивная сложность обуславливает необходимость использования очищенной и умягченной воды для предотвращения засорения сопел и накопления минеральных отложений на рабочих поверхностях, таких как лопатки компрессора и элементы турбины. Применение данной технологии преимущественно оправдано в условиях, требующих эффективно-го охлаждения больших пространств или быстрого снижения температуры окружающей среды.

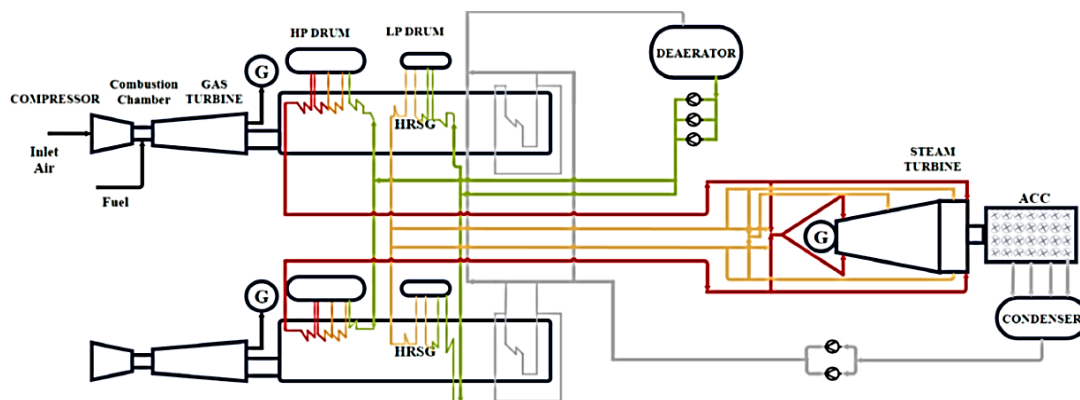


Рис.2. Схема парогазовой установки. (Compressor - компрессор; Inlet air - входящий воздух; Fuel - топливо; Combustion Chamber - камера сгорания; Gas turbine - газовая турбина; G - генератор; HRSG - котёл-утилизатор; HP DRUM - барабан высокого давления; LP DRUM - барабан низкого давления; Deaerator - деаэратор; Steam turbine - паровая турбина; ACC - воздушный конденсатор; Condenser - конденсатор).

Fig.2. Combined cycle power plant diagram (Compressor; Inlet air; Fuel; Combustion Chamber; Gas turbine; G – Generator; HRSG – Heat Recovery Steam Generator; HP Drum – High-Pressure Drum; LP Drum – Low-Pressure Drum; Deaerator; Steam Turbine; ACC – Air-Cooled Condenser; Condenser).

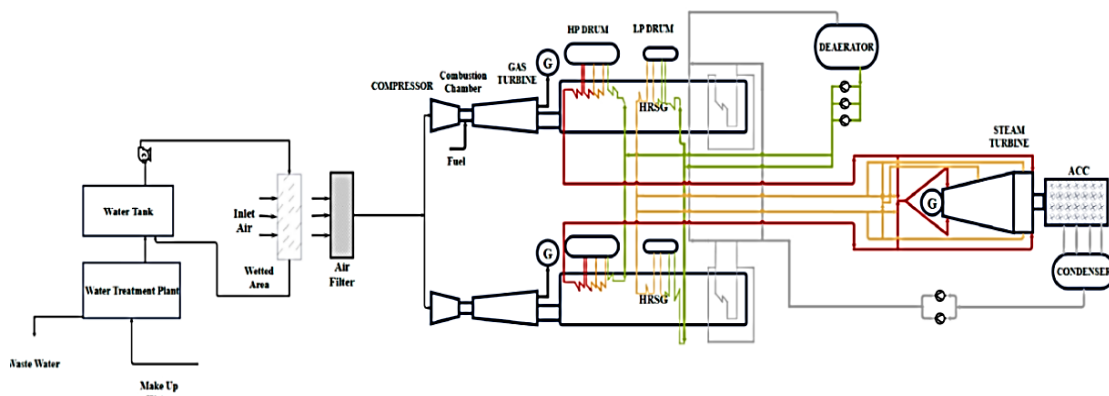


Рис.3. Схема системы охлаждения приточного воздуха с испарительным охладителем (Water Tank - водяной бак; Water Treatment Plant - установка водоочистки; Make Up Water - подпиточная вода; Make Water - сырая вода; Air Filter - воздушный фильтр; HRSG - котёл-утилизатор)

Fig.3. Inlet air cooling system diagram with an evaporative cooler (Water Tank; Water Treatment Plant; Make-Up Water; Raw Water; Air Filter; HRSG – heat recovery steam generator)

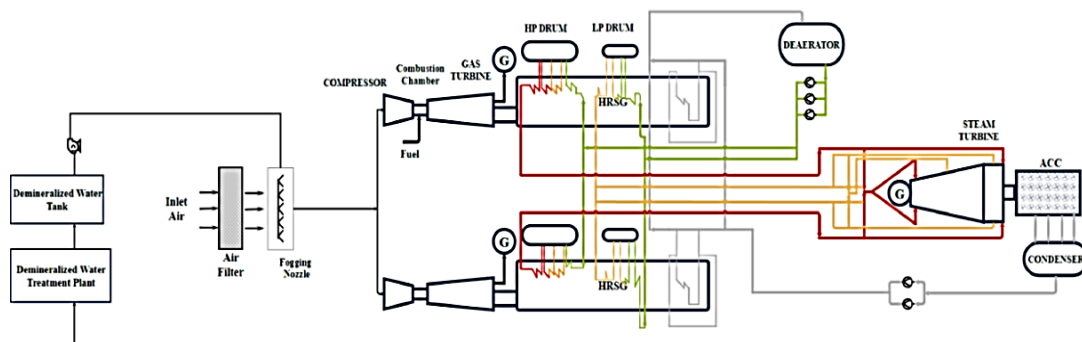


Рис.4.Схема системы охлаждения входящего воздуха методом распыления (Demineralized Water Tank - бак деминерализованной воды (служит для хранения очищенной воды); Demineralized Water Treatment Plant - установка деминерализации воды (предназначена для удаления солей и примесей); Fogging System - система испарительного охлаждения (осуществляет охлаждение воздуха путём распыления воды))

Fig.4.Inlet air cooling system diagram using spray cooling (Demineralized Water Tank); Demineralized Water Treatment Plant; Fogging System – evaporative cooling system (cools air by spraying fine water mist)

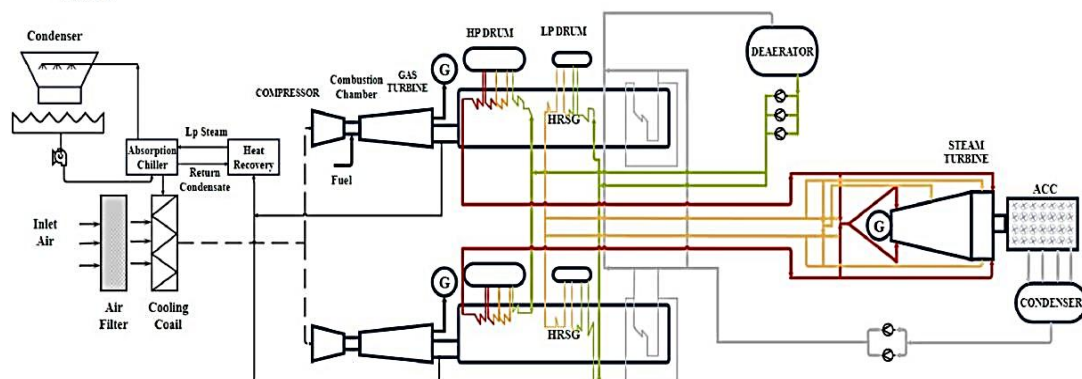


Рис.5.Схема системы охлаждения входящего воздуха с помощью абсорбционного chillера (Cooled Air - охлаждённый воздух (подаётся после системы охлаждения); Condenser - конденсатор (охлаждает и конденсирует рабочее вещество); Absorber - абсорбер (поглощает хладагент абсорбентом); LP Sol. Heat Exchanger - низкотемпературный растворный теплообменник (осуществляет теплообмен между растворами); Cooling Coil - охлаждающий змеевик (снижает температуру воздуха))

Fig. 5. Inlet air cooling system diagram using an absorption chiller (Cooled Air; Condenser; Absorber; LP Solution Heat Exchanger; Cooling Coil)



С термодинамической точки зрения, системы испарительного охлаждения и туманообразования различаются по принципам реализации процесса испарения. В испарительных системах охлаждение достигается за счёт поглощения явной теплоты воздуха для испарения воды, что приводит к трансформации этой теплоты в скрытую теплоту парообразования. Этот процесс протекает при постоянной энтальпии системы, где увеличение влажности воздуха сопровождается снижением его температуры. Напротив, в системах туманообразования процесс испарения интенсифицируется за счёт формирования микрокапель под высоким давлением, что ускоряет теплообмен между водой и воздухом.

Таким образом, системы туманообразования демонстрируют повышенную эффективность в условиях, требующих мгновенного охлаждения, благодаря оптимизированному распределению капель и увеличенной поверхности теплообмена. В то же время, испарительные системы остаются более простыми в эксплуатации, но менее универсальными, поскольку их эффективность ограничена характеристиками окружающей среды и отсутствием необходимости в сложной инфраструктуре для подготовки воды.

В абсорбционных системах охлаждения вода выступает в роли хладагента, тогда как раствор бромида лития выполняет функцию абсорбента, обеспечивая эффективное поглощение паров воды. Ключевым процессом, определяющим охлаждающий эффект, является снижение давления в испарителе, что приводит к уменьшению температуры кипения воды. В результате этого процесса вода в испарителе испаряется, поглощая теплоту из охлаждаемой среды, что способствует снижению её температуры.

Для поддержания низкого давления в испарителе и обеспечения непрерывного испарения образовавшийся водяной пар направляется в секцию абсорбера, где он поглощается раствором бромида лития. Температура абсорбента в этой секции регулируется за счёт теплообмена с водой, поступающей из градирни, что предотвращает перегрев системы. По мере поглощения пара раствор бромида лития постепенно разбавляется, что снижает его абсорбционную способность.

Для восстановления эффективности абсорбента осуществляется процесс регенерации в генераторе. На этом этапе к разбавленному раствору подаётся тепловая энергия, что приводит к испарению воды и концентрированию бромида лития. Выделенный водяной пар поступает в конденсатор, где он конденсируется в жидкое состояние и возвращается в испаритель, замыкая цикл охлаждения.

Таким образом, абсорбционная система охлаждения характеризуется высокой энергоэффективностью в условиях, где доступна тепловая энергия для регенерации абсорбента, обеспечивая непрерывный и стабильный процесс охлаждения с использованием экологически безопасных рабочих веществ.

Многолетние исследования подтверждают, что использование систем охлаждения воздуха на входе компрессоров электростанций с комбинированным циклом (ЭКЦ) оказывает значительное влияние на производительность, энергоэффективность, водопотребление и экономические показатели работы системы. В настоящем исследовании представлен сравнительный анализ четырёх режимов эксплуатации: базового режима без охлаждения и трёх методов охлаждения — испарительного охлаждения, туманообразования и абсорбционного чиллера. Выбор оптимального метода охлаждения определяется эксплуатационными приоритетами, условиями окружающей среды и ресурсными ограничениями, что подчёркивает необходимость детального изучения технических и экономических аспектов каждого подхода.

3. Результаты (Results)

1. Режим без охлаждения. В данном режиме производительность ЭКЦ ограничена температурой окружающего воздуха. Высокие температуры на входе компрессора снижают плотность воздуха, что уменьшает массовый расход и, следовательно, выходную мощность турбины. Энергоэффективность остается стабильной, но не достигает оптимальных значений, характерных для систем с охлаждением. Водопотребление отсутствует, а эксплуатационные затраты минимальны, однако режим неэффективен в жарких климатических условиях.

2. Испарительное охлаждение. Испарительное охлаждение демонстрирует умеренное увеличение мощности (на 5–10% в зависимости от условий) за счет снижения температуры воздуха на входе компрессора. Энергоэффективность возрастает благодаря снижению работы компрессора, но метод ограничен высокой влажностью окружающей среды, которая снижает эффективность испарения. Водопотребление относительно низкое, а капитальные затраты умеренные, что делает метод экономически привлекательным для регионов с сухим климатом. Основным недостатком является чувствительность к качеству воды и риск коррозии оборудования.

3. Туманообразование. Система туманообразования обеспечивает более значительное увеличение мощности (до 15–20%) за счёт интенсивного охлаждения и увеличения массового расхода воздуха. Высокое давление и мелкодисперсное распыление воды способствуют быстрому



теплообмену, что повышает энергоэффективность. Однако метод требует значительного водопотребления и использования очищенной воды для предотвращения засорения сопел и отложений на лопатках турбины. Капитальные затраты выше, чем при испарительном охлаждении, из-за необходимости сложного оборудования (насосы высокого давления, игольчатые сопла). Метод оптимален для жарких и сухих условий, но расходы возрастают из-за водоподготовки.

4. Абсорбционный чиллер. Абсорбционный чиллер обеспечивает наибольшее увеличение мощности (до 20–25%) благодаря стабильному снижению температуры воздуха независимо от влажности окружающей среды. Энергоэффективность системы высока, так как процесс охлаждения использует тепловую энергию (например, отработанное тепло ЭКЦ) для регенерации абсорбента. Водопотребление умеренное, но требуется дополнительная инфраструктура для градирни и системы водоподготовки. Капитальные затраты являются наиболее высокими из-за сложности оборудования, а эксплуатационные расходы зависят от доступности тепловой энергии. Метод предпочтителен для регионов с высокой температурой и влажностью, где испарительное охлаждение и туманообразование менее эффективны.

4. Обсуждение (Discussion)

Приведём технико-экономический анализ некоторых основных показателей:

- производительность: абсорбционный чиллер демонстрирует наибольший прирост мощности, за ним следует туманообразование, затем испарительное охлаждение. Режим без охлаждения наименее эффективен;
- энергоэффективность: все методы охлаждения повышают энергоэффективность по сравнению с базовым режимом, но абсорбционный чиллер обеспечивает наилучшие показатели за счет использования отработанного тепла;
- водопотребление: туманообразование характеризуется наивысшим водопотреблением, тогда как испарительное охлаждение и абсорбционный чиллер требуют меньших объемов воды;
- экономические затраты: испарительное охлаждение имеет наименьшие капитальные затраты, тогда как абсорбционный чиллер требует значительных инвестиций. Эксплуатационные расходы варьируются в зависимости от стоимости воды и энергии;
- адаптивность: испарительное охлаждение и туманообразование эффективны в сухом климате, тогда как абсорбционный чиллер универсален и подходит для любых условий.

5. Заключение (Conclusion)

Выбор метода охлаждения воздуха на входе компрессоров ЭКЦ должен основываться на комплексной оценке эксплуатационных приоритетов, климатических условий и доступности ресурсов. Испарительное охлаждение является наиболее экономичным решением для сухих регионов с ограниченным бюджетом. Туманообразование предпочтительно для достижения высокого прироста мощности в жарком климате, несмотря на повышенное водопотребление. Абсорбционный чиллер обеспечивает максимальную производительность и энергоэффективность, но требует значительных капиталовложений и доступа к тепловой энергии. Таким образом, оптимальный выбор метода зависит от баланса между техническими характеристиками, экономическими факторами и условиями эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Najjar, Y. S. H., Al-Zoghool, Y. M. A. «Sustainable energy development in power generation by using green inlet-air cooling technologies with gas turbine engines». — Journal of Engineering Thermophysics, 2015, т. 24, с. 181–204.
2. Moradi A., Masoomi M., Salehi G. R., Khoshgoftar Manesh M. H. «Performance Analysis of Gas Turbine Inlet Air Cooling Plant with Hybrid Indirect Evaporative Cooling and Absorption Chiller System». — International Journal of Thermodynamics, 2021, т. 24(3), с. 248–259.
3. Techno-Economic Assessment of Different Inlet Air Cooling Systems in Warm Dry & Wet Climate Stations.
4. Geng Z. «Analysis of gas turbine inlet cooling system based on double-effect lithium bromide absorption chiller». — International Journal of Frontiers in Engineering Technology, 2022, т. 4(10), с. 51–55.
5. Khaledi H., Zomorodian R., Ghofrani M. B. «Effect of Inlet Air Cooling by Absorption Chiller on Gas Turbine and Combined Cycle Performance». — ASME IMECE 2005 Proceedings, 2008.
6. Araner. Inlet air cooling methods for gas turbine: a comparison. — Araner Engineering Blog.
7. Gas turbine performance enhancement by inlet air cooling and coolant pre-cooling using an absorption chiller. Inha University, 2020.
8. Comparison of different gas turbine inlet air cooling methods. — ResearchGate, 2015.



REFERENCES

1. Najjar, Y. S. H., Al-Zoghool, Y. M. A. «Sustainable energy development in power generation by using green inlet-air cooling technologies with gas turbine engines». — *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, т. 24, с. 181–204.
2. Moradi A., Masoomi M., Salehi G. R., Khoshgoftar Manesh M. H. «Performance Analysis of Gas Turbine Inlet Air Cooling Plant with Hybrid Indirect Evaporative Cooling and Absorption Chiller System». — *International Journal of Thermodynamics*, 2021, т. 24(3), с. 248–259.
3. Techno-Economic Assessment of Different Inlet Air Cooling Systems in Warm Dry & Wet Climate Stations.
4. Geng Z. «Analysis of gas turbine inlet cooling system based on double-effect lithium bromide absorption chiller». — *International Journal of Frontiers in Engineering Technology*, 2022, т. 4(10), с. 51–55.
5. Khaledi H., Zomorodian R., Ghofrani M. B. «Effect of Inlet Air Cooling by Absorption Chiller on Gas Turbine and Combined Cycle Performance». — *ASME IMECE 2005 Proceedings*, 2008.
6. Araner. Inlet air cooling methods for gas turbine: a comparison. — *Araner Engineering Blog*.
7. Gas turbine performance enhancement by inlet air cooling and coolant pre-cooling using an absorption chiller. — *Inha University*, 2020.
8. Comparison of different gas turbine inlet air cooling methods. — *ResearchGate*, 2015.