

Литература

1. Швец И. Т., Дыбан Е. П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. – Киев: Наук. думка, 1974. - 487 с.
2. Копелев С.З., Тихонов Н.Д. Расчет турбин авиационных двигателей. - М.: Машиностроение, 1974. - 268 с.
3. Nikuradse I. Turbulente Stromung in nicht kreisformigen Rohren // Ing. Arch. - 1930. - Bd. 1. - S. 306-332.
4. Гесснер Ф. Б., По Дж. К., Эмери А. Ф. Измерения развивающегося турбулентного течения в квадратном канале / Пер. с англ. под ред. А. С. Гиневского // Турбулентные сдвиговые течения. 1.-М.: Машиностроение, 1982. - 432 с.
5. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. -М.: Наука, 1972.-471 с.
6. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 671 с.
7. Goldstein R.J., Yoo S.Y., Chung M.K. Convective Mass Transfer from a Square Cylinder and its Base Plate. – P. 90-103.
8. Wang H.P., Olson S.J., Eckert R.G. Flow Visualization in a Linear Turbine Cascade of High Performance Turbine Blades // ASME Paper 95-GT-7.
9. Хапатов А.А., Коваленко А.С. Теплообмен и гидродинамика ускоренного потока в плоских криволинейных каналах. -Киев: Наук, думка, 2006.-224 с.

УДК 621.175

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И КОНТАКТНОГО ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВЛАГИ ИЗ ГАЗОПАРОВОЙ СМЕСИ С МАЛЫМ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕМ

С. А. Кузнецова

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

ОАО «НЭТ»»

а/я 17, г. Николаев, Украина, 54030

Контактный тел.: 8 (0512) 35-32-98

E-mail – aootnet@ukr.net

Надано обґрунтування заміни випарно-го охолодження газопарової суміші теплопередачею для підвищення енергоефективності тепло- і масоутилізаційного контуру в контактних газопарових турбінних установках

Ключові слова: заміна, випарне охолодження, теплопередача, енергоефективність, контактна газопаротурбінна установка

Представлено обоснование замены испарительного охлаждения газопаровой смеси теплопередачей для повышения энергоэффективности тепло- и масоутилизационного контура в контактных газопаровых турбинных установках.

Ключевые слова: замена, испарительное охлаждение, теплопередача, энергоэффективность, контактная газопаротурбинная установка

The justification of substitution of vapor cooling of steam-and-gas mixture by the heat transfer for energy efficiency heightening of heat mass utilization circuit in contact gas-steam turbine plant are presented

Key words: substitution, vapor cooling, heat transfer, energy efficiency, a contact gas-steam turbine plant

Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими заданиями

Контактные газопаровые турбинные установки (КПТУ) используют утилизацию теплоты и массы газопаровой смеси с малым влагосодержанием (ГПС).

При этом утилизацию теплоты осуществляют в паровом котле-утилизаторе (КУП), а массы - в контактном конденсаторе (КК), которые являются элементами тепло- и масоутилизационного контура (ТМУК) (рис. 1). Утилизацию воды из газопаровой смеси в дей-

ствующих КГПТУ, осуществляют по ходу смеси двумя последовательными теплообменными процессами: первым - испарительным охлаждением и вторым - контактной конденсацией. Этим достигается возврат воды в цикл в количестве, достаточном для работоспособности установки, но приводит к дополнительным потерям по теплоте, влаге и затратам электроэнергии в элементах ТМУК.

Снижение этих потерь требует дальнейшего повышения эффективности ТМУК и в целом КГПТУ. Повышение эффективности ТМУК при заданных паропроизводительности, температуре и давлении перегретого водяного пара, определяется количеством дополнительно утилизируемой теплоты от ГПС для получения насыщенного пара и горячей воды. Количество насыщенного пара и горячей воды зависит от их потребности для производственных и бытовых нужд. Снижение температуры ГПС после дополнительной утилизации уменьшает количество теплоты, которое отводится в окружающую среду и затраты электроэнергии на привод элементов ТМУК (водяных насосов и воздушных вентиляторов).

Поэтому разработка новых схемных решений ТМУК, для стационарных и транспортных КГПТУ наземного и морского базирования, является важным научным и практическим заданием.

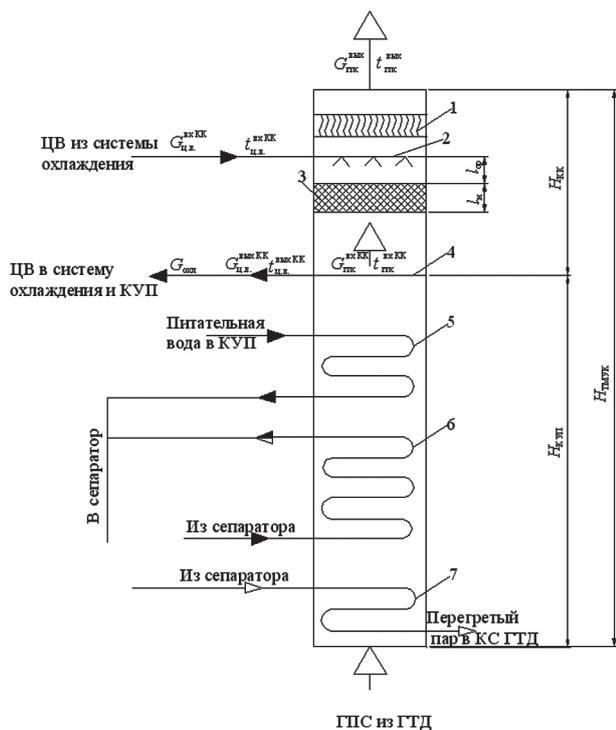


Рис. 1. Схема ТМУК без предварительной теплопередачи: 1 - инерционный влагоотделитель; 2 - оросительное устройство; 3 - сетчатая насадка; 4 - конденсаторосборник; 5 - экономайзер; 6 - испаритель; 7 - пароперегреватель

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы

Результаты эксплуатации и направления совершенствования процессов в ТМУК для ГПУ-16К мощ-

ностью 16 МВт на ГКС «Ставищенская» приведены в [1, 2, 3, 4]. Исследования процессов теплообмена в КК показали возможность дальнейшего совершенствования этих аппаратов [5, 6, 7]. Повышение эффективности утилизации воды в КК возможно при уменьшении длины участка испарительного охлаждения и увеличении конденсационного участка. Влияние конструктивных особенностей сетчатой насадки на сокращение длины испарительного участка, дисперсности распыла, и длины оросительного участка на эффективность работы КК по утилизации влаги представлены в [8].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья

В проведенных исследованиях отсутствует решение задачи влияния предварительной теплопередачи в поверхностном теплообменном аппарате (ПТА) с оребренной поверхностью и последующих процессов теплообмена в контактном конденсаторе на эффективность тепло- и массоутилизационного контура.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является определение зависимости показателей эффективности ТМУК от соотношений длительности процессов теплопередачи, испарительного охлаждения и контактной конденсации ГПС.

Достижение указанной цели сводится к решению следующих задач:

- определению влияния предварительной теплопередачи на длительность процессов испарительного охлаждения и контактной конденсации ГПС;
- определению потребления дополнительной электрической энергии при предварительной теплопередаче водяными насосами и воздушными вентиляторами для охлаждения ГПС;
- определению габаритных показателей ТМУК при предварительной теплопередаче;
- оптимизация габаритных показателей ТМУК в зависимости от потребностей объекта в горячей воде или горячей воде и паре.

Изложение основного материала исследований с полным обоснованием полученных научных результатов

Схемные решения ТМУК при применении предварительной теплопередачи до испарительного охлаждения представлены на рис. 2, 3. На схемах в поверхностных теплообменных аппаратах используют циркуляционную воду на выходе из КК. Для этого циркуляционную воду за КК разделяют на потоки в зависимости от потребности в горячей воде и насыщенном паре.

Температура циркуляционной воды на входе постоянна для всех трех потоков и равна температуре циркуляционной воды на выходе из КК.

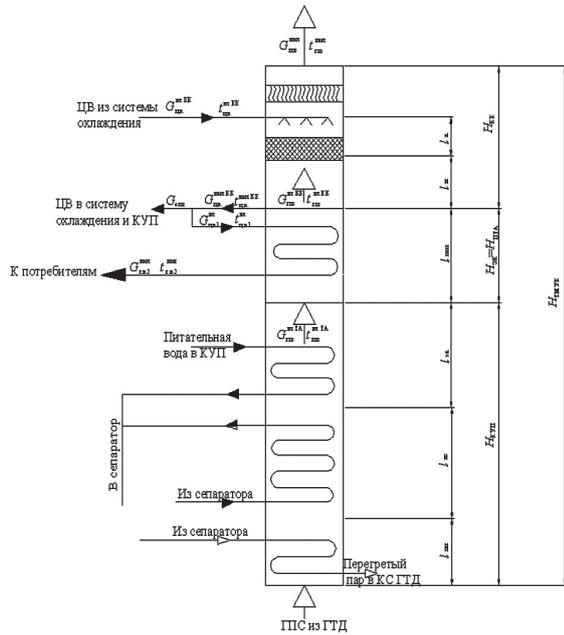


Рис. 2. Схема ТМУК с предварительной теплопередачей для получения дополнительной горячей воды

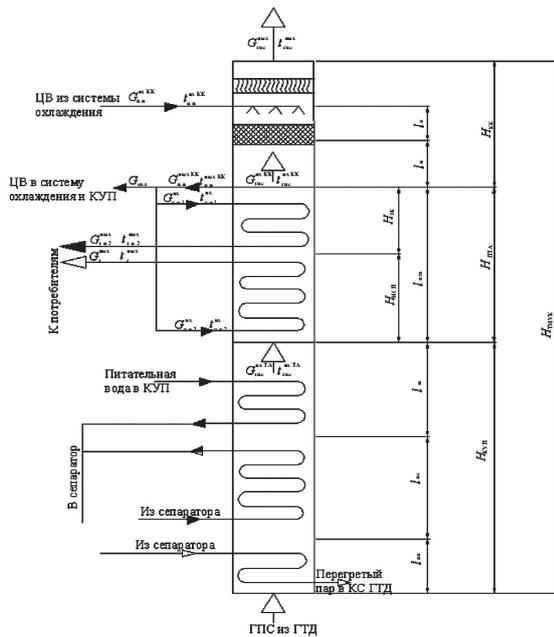


Рис. 3. Схема ТМУК с предварительной теплопередачей для получения дополнительного насыщенного пара и горячей воды

Главное отличие этих схем состоит в возможности получения насыщенного пара при утилизации и снижении количества теплоты, передаваемой воде от ГПС в конденсаторе. В этих схемах общая длина участка процессов тепло- и массообмена в ТМУК определяется согласно формуле

$$l_{\text{ТМУК}} = l_{\text{шт}} + l_{\text{ис}} + l_{\text{эк}} + l_{\text{штп}} + l_{\text{и}} + l_{\text{к}}$$

где $l_{\text{шт}}$ – длина участка перегрева пара в КУП, м; $l_{\text{ис}}$ – длина участка испарения в КУП, м; $l_{\text{эк}}$ – длина участка нагревания воды в КУП, м; $l_{\text{штп}}$ – длина

участка предварительной теплопередачи, на котором вырабатывается насыщенный пар и горячая вода, м; $l_{\text{и}}$ – длина участка испарительного охлаждения и $l_{\text{к}}$ – длина участка контактной конденсации, м.

Исследования совокупности процессов проводилось путем численного моделирования процессов предварительной теплопередачи, испарительного охлаждения и контактной конденсации. Для моделирования процессов теплопередачи использовались методики, которые применяются при проектировании утилизационных котлов [9,10,11]. Для исследования процессов испарительного охлаждения, контактной конденсации в КК и теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения (АВО) использовалась методика [12].

Процесс предварительной теплопередачи моделировался на поверхности шахматного пучка труб с оребренной наружной поверхностью.

Использование теплопередачи позволяет снижать температуру ГПС до температуры предшествующей температуре начала процесса контактной конденсации. Это приводит к сокращению длины участка испарительного охлаждения и увеличению - контактной конденсации.

Процессы испарительного охлаждения и контактной конденсации наиболее интенсивно происходят в сетчатой насадке и на оросительном участке КК. Поэтому при исследовании влияния предварительной теплопередачи на конденсацию влаги из ГПС длины сетчатой насадки и оросительного участка приняты постоянными.

Исходными данными для исследования приняты конструктивные показатели и параметры рабочих сред для КГПТУ мощностью 16 МВт. Температура и расход ГПС на входе в поверхностный теплообменный аппарат соответствуют параметрам смеси на выходе из КУП т.е. $t_{\text{ГПС}}^{\text{вх ПТА}} = 180...179 \text{ }^\circ\text{C}$ и $G_{\text{ГПС}}^{\text{вх ПТА}} = G_{\text{ГПС}}^{\text{вх КК}} = 44...44,5 \text{ кг/с}$. Условием прибыти воды в цикл установки, для обеспечения ее работоспособности с учетом компенсации постоянных и периодических продувок конденсатно-питательной системы, является значение показателя эффективности по возврату воды равное 1,1. Температура циркуляционной воды на входе в конденсатор принимается с учетом возможности ее поддержания в теплый период года аппаратами охлаждения с коэффициентом эффективности охлаждения воды 0,75...0,8 на уровне 30...31 $^\circ\text{C}$.

На основании исходных данных потребителей тепловой энергии в стационарных и морских установках, температура горячей воды принималась 93...94 $^\circ\text{C}$, а насыщенного пара - 152 $^\circ\text{C}$. Расход пара принимался величиной постоянной и ограничивался температурой насыщения, термическим сопротивлением материала теплообменной поверхности. Его относительный расход по отношению к расходу ГПС на входе в КК составлял около 0,0094.

Определение влияния предварительной теплопередачи на длительность процессов испарительного охлаждения и контактной конденсации ГПС.

Результаты исследования влияния температуры ГПС перед КК ($t_{\text{ГПС}}^{\text{вх КК}}$) после предварительной теплопередачи на изменение соотношения длин участков испарительного охлаждения и контактной конденсации представлено на рис. 4. Предварительная теплопередача позволяет снижать относительную длину испарительного участка с 0,53 до 0,08 и дополнительно получать горячую воду или насыщенный пар и горячую воду.

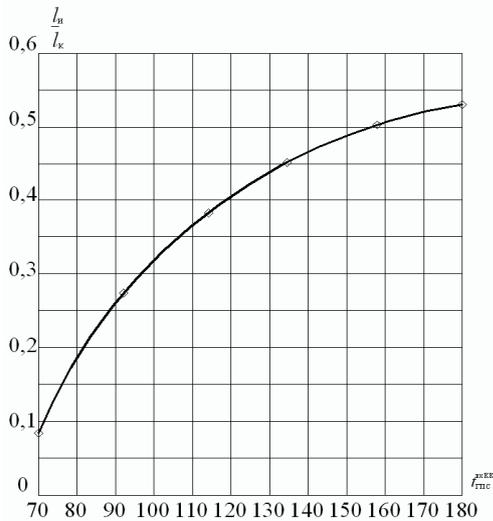


Рис. 4. Зависимость относительной длины испарительного участка от температуры ГПС на входе в КК

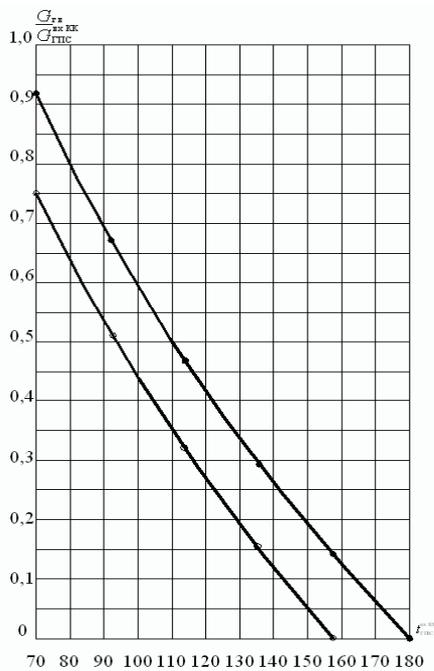


Рис. 5. Зависимость относительного расхода горячей воды от температуры ГПС на входе в КК:

- - для схемы ТМУК представленной на рис. 2;
- - для схемы ТМУК представленной на рис. 3

При фиксированной паропроизводительности насыщенного пара зависимости влияния температуры ГПС перед КК на относительный расход горячей воды для обеих схем представлены на рис. 5.

Из этих результатов следует, что наибольшее относительное количество горячей воды для схем с получением горячей воды, насыщенного пара и горячей воды равны соответственно 0,92 и 0,75. При температуре ГПС равной 158°C возможно дополнительно получить горячую воду с относительный расход 0,14 или только насыщенный пар в количестве 0,0094 без горячей воды.

Определение потребления дополнительной электрической энергии водяными насосами и воздушными

вентиляторами для охлаждения ГПС при предварительной теплопередачи.

Применение предварительной теплопередачи повышает затраты электроэнергии на привод водяных насосов для поверхностного теплообменного аппарата и снижает потребление электроэнергии циркуляционным насосом и аппаратами воздушного охлаждения. Снижение потребления электроэнергии циркуляционным насосом объясняется уменьшением расхода циркуляционной воды на входе в КК с 222 до 134 кг/с, при этом температура воды на выходе из КК повышается на 5...6 до 62°C. Повышение температуры и уменьшение расхода циркуляционной воды, направляемой в охладители, позволяет снизить количество отводимой теплоты с 22827 до 16829 кВт. Это позволяет снизить количество работающих охлаждающих аппаратов. Так для АВО их количество может быть уменьшено с 7 до 5.

Для анализа затрат электрической энергии, обеспечивающих работу ТМУК, используются следующие безразмерные показатели:

$$\text{для водяных насосов} \quad - \Delta N_{\text{отн ПТА}} = \frac{\Delta N_{\text{ПТА}}}{N_{\text{КГПТУ}}}$$

$$\text{для циркуляционных насосов} \quad - \Delta N_{\text{отн ЦН}} = \frac{\Delta N_{\text{ЦН}}}{N_{\text{КГПТУ}}};$$

- для аппаратов воздушного охлаждения -

$$\Delta N_{\text{отн АВО}} = \frac{\Delta N_{\text{АВО}}}{N_{\text{КГПТУ}}}$$

- для ТМУК -

$$\Delta N_{\text{отн ТМУК}} = \Delta N_{\text{отн ПТА}} - \Delta N_{\text{отн ЦН}} - \Delta N_{\text{отн АВО}}$$

где $\Delta N_{\text{ПТА}}$, $\Delta N_{\text{ЦН}}$, $\Delta N_{\text{АВО}}$ - соответственно изменения затрат электрической энергии на привод насосов ПТА, циркуляционных насосов и аппаратов воздушного охлаждения; $N_{\text{КГПТУ}}$ - номинальная мощность КГПТУ.

Зависимости безразмерных показателей затрат электрической энергии элементов, обеспечивающих работу ТМУК, от температуры ГПС на входе в КК представлены на рис. 6.

Результат свидетельствуют о возможности снижения затрат электроэнергии на работу элементов ТМУК до 0,0048...0,0057 от номинальной мощности КГПТУ.

Определение габаритных показателей ТМУК при предварительной теплопередаче.

Применение промежуточной теплопередачи в поверхностном теплообменном аппарате позволяет повысить эффективность ТМУК и установки в целом, но это связано и с увеличением массогабаритных показателей комплекса. При одинаковых площадях поперечного сечения теплообменных аппаратов и КК оценка габаритов может быть выполнена по показателям относительной высоты ТМУК:

- с получением дополнительной горячей воды (рис. 2)

$$H_{\text{отн ТМУК}} = \frac{H_{\text{КУП}} + H_{\text{ЭК}} + H_{\text{КК}}}{H_{\text{КУП}} + H_{\text{КК-40}}}$$

- с получением дополнительного насыщенного пара и горячей воды (рис. 3)

$$H_{отн\ ТМУК} = \frac{H_{КУП} + H_{эк} + H_{исп} + H_{КК}}{H_{КУП} + H_{КК-40}}$$

где $H_{отн\ ТМУК}$ – относительная высота усовершенствованного ТМУК; $H_{КУП}$ – высота КУП; $H_{эк}$ – высота экономайзера в теплообменном аппарате, $H_{исп}$ – высота испарителя в теплообменном аппарате; $H_{КК}$ – высота КК установленного за дополнительным теплообменным аппаратом; $H_{КК-40}$ – высота КК ГПУ-16К.

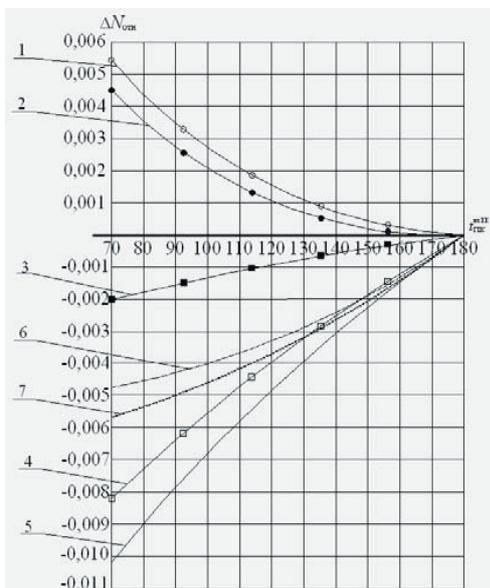


Рис. 6. Зависимости затрат электрической энергии элементами ТМУК от температуры ГПС на входе в КК: 1, 2 - для водяных насосов ПТА; 3 - для циркуляционного насоса; 4 - для АВО; 5 - суммарная для циркуляционного насоса и АВО; 6 и 7 - суммарные для ТМУК рис. 3 и 2

Результаты исследования представлены на рис. 7. Применение предварительной теплопередачи и сокращение расхода циркуляционной воды позволило снизить высоту конденсатосборника и диаметр сливных патрубков при сохранении их общего числа – 8. Снижение высоты КК за счет уменьшения высоты конденсатосборника на рис 7 представлены, как относительная

высота КК по отношению к высоте контактного конденсатора ГПУ-16К - КК-40.

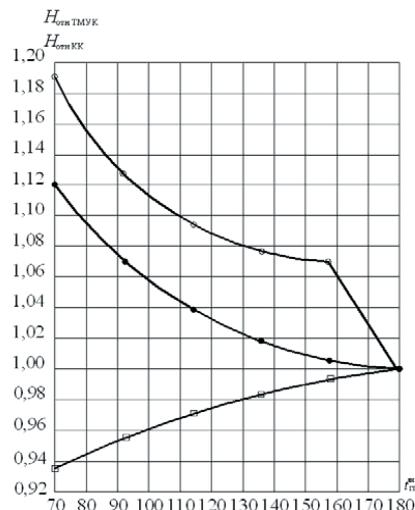


Рис. 7. Зависимость относительной высоты от температуры ГПС на воде в КК: □ - для КК; остальные обозначения, как на рис. 5

Наличие экономайзера для получения дополнительного количества горячей воды увеличивает относительную высоту ТМУК до 1,12, испарителя для получения пара при температуре $t_{гпс}^{вх\ КК} = 158^{\circ}C$ до 1,07 и испарителя с экономайзером для получения пара и горячей воды до 1,19. Верхние значения показывают, что увеличение высоты ТМУК не превышает 1/5 от высоты используемого комплекса. Полученные результаты учитывают снижение относительной высоты КК до 0,937.

Оптимизация габаритных показателей ТМУК в зависимости от потребностей объекта в горячей воде или горячей воде и паре.

ТМУК является вспомогательным элементом КГПТУ, обеспечивающим работоспособность и эффективность установки в целом. Поэтому оптимизацию габаритных показателей ТМУК необходимо

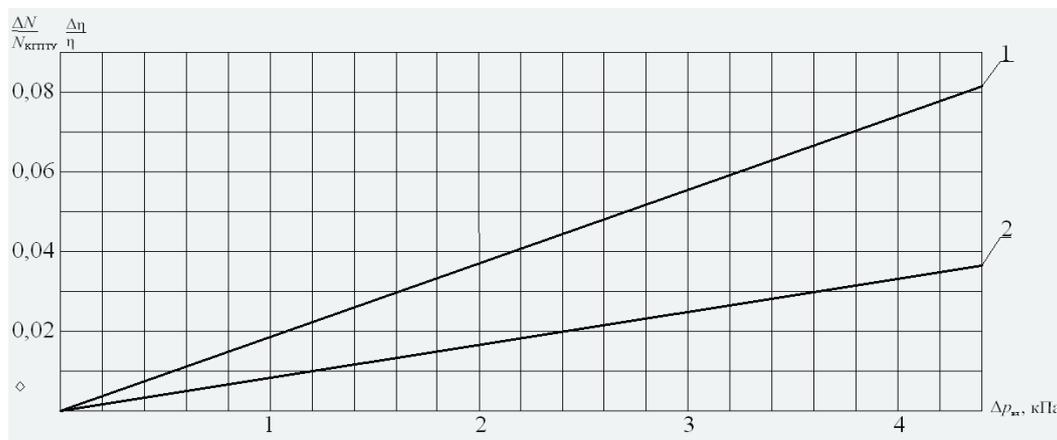


Рис. 8. Зависимости изменения относительных величин мощности и КПД КГПТУ от изменения потерь полного давления в газоотводящем устройстве: 1 - относительная мощность; 2 - относительный КПД

выполнять с учетом общей эффективности КППТУ. Общая эффективность КППТУ характеризуется суммарной полезной мощностью, которая определяется как разность эффективной мощности на привод потребителя и суммарной мощности на привод элементов ТМУК.

Эффективная мощность КППТУ зависит от потерь полного давления в газоотводящем устройстве, которые однозначно определяются суммарными потерями полного давления в элементах ТМУК - $\Delta p_{\text{врых}}$.

Зависимости изменения относительных величин мощности и КПД КППТУ от изменения потерь полного давления в газоотводящем устройстве представлены на рис. 8.

Определение целевой функции при оптимизации габаритных показателей ТМУК выполняется с учетом зависимости влияния этих показателей на общую эффективность КППТУ. Исходя из этого условия по результатам оптимизационных расчетов положительное применение предварительной теплопередачи за КУП возможно при увеличении площади в газоотводящем устройстве и КК или в КУП, газоотводящем устройстве и КК.

Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления

1. Предварительная теплопередача перед испарительным охлаждением и контактной конденсацией из газопаровой смеси с малым влагосодержанием позволяет уменьшить длительность испарительного охлаждения в 6...6,7 раз и снизить расход охлаждающей воды в 1,6...1,7 раза с дополнительным получением горячей воды и насыщенного пара.

2. Количество дополнительно получаемых горячей воды и пара определяется схемой ТМУК и может составлять от расхода ГПС соответственно 0,92...0,75 и пара - 0...0,0094.

3. Применение в ТМУК поверхностного теплообменного аппарата для дополнительной утилизации теплоты ГПС снижает затраты электроэнергии на работу элементов ТМУК до 0,0048...0,0057 от номинальной мощности КППТУ и увеличивает потери полного давления в газоходе.

4. Определение массогабаритных показателей ТМУК при применении поверхностного теплообменного аппарата выполняется на базе оптимизационных расчетов при увеличении площади в газоотводящем устройстве и КК или в КУП, газоотводящем устройстве и КК.

Литература

1. Коломеев В.М., Ксендзюк М.В., Романов В.В., Мовчан С.М., Шевцов А.П., Кузнецова С.А., Дикий М.О. ГПУ-16К: дослідно-промислова експлуатація, міжвідомчі приймальні випробування, перспективи використання

// Нафтова і газова промисловість, Науково-виробничий журнал. – Київ. – 2006, – №4, С. 38–40.

2. Романов В.І, Коломеев В.М., Ксендзюк М.В., Дикий М.О., Кривуца В.А., Шевцов А.П., Кучеренко О.С. Підвищення ефективності функціонування утилізаційного контуру КППТУ „Водолій” // Нафтова і газова промисловість, Науково-виробничий журнал. – Київ. – 2000, – №6, С. 43–46.
3. Исаков Б.В., Мовчан С.М., Расошанский В.С., Бочкарев Ю.В., Шевцов А.П., Кузнецова С.А., Коломеев В.М., Избаш В.І, Ксендзюк М.В. Контактний конденсатор установки ГПУ-16К // Нафтова і газова промисловість, Науково-виробничий журнал. – Київ. – 2005. – №5, С. 53 – 55.
4. Избаш В.И., Кучерук Н.В., Мовчан С.Н., Филоненко А.А., Шевцов А.П., Кузнецова С.А. Опыт эксплуатации и пути совершенствования газоперекачивающей установки ГПУ-16К и ее составных частей // Промышленная теплотехника, ИТТФ НАН Украины. 2007. – Т. 29, № 7. – С. 120 – 124.
5. Кузнецова С.А. Опыт эксплуатации и перспективы совершенствования системы охлаждения контактного конденсатора для контактной газопаротурбинной установки // Промышленная теплотехника, ИТТФ НАН Украины. 2007. – Т. 29, № 7. – С. 135 – 138.
6. Кучеренко О.С., Мовчан С.Н., Романов В.В., Чобенко В.Н., Кузнецова С.А., Шевцов А.П. Контактные газопаротурбинные установки «Водолей» - состояние и перспективы // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип.2. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – С. 197 – 209.
7. Кузнецова С.А., Кузнецов В.В. Энергобережения при експлуатації ГПА на морських об'єктах видобутку та транспортування природного газу // Энергетика: економіка, технології, екологія, Науковий журнал. – Київ: НТУУ „Київський політехнічний інститут”, 2008. – №2, С. 39 – 43.
8. С.А. Кузнецова. Влияние конструктивных параметров элементов циркуляционных контуров на их показатели эффективности // Зб.наук.працьУДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – № 6 (392). – С. 108 – 116.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред.Н.В.Кузнецова и др., М., „Энергия”, 1973.296с.
10. Гидравлический расчет котельных агрегатов: (Нормативный метод)/ Балдина О.М., Локшин В.А., Петерсон Д.Ф., и др.; Под ред.. В.А.Локшина и др. – М.:Энергия, 1978. – 256 с.
11. Аэродинамический расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. С.И.Мочана. Изд. 3-е , Л., „Энергия”, 1977.256с.
12. Кузнецова С.А. Моделирование тепломассообменных и гидродинамических процессов в элементах циркуляционного контура контактных газопаротурбинных установок // Промышленная теплотехника – К.: ИТТФ НАН Украины. – 2003. – Т.25, № 6. – С. 28 – 33.