

УДК 624.245

Оптимизация энергетических характеристик устройств рекуперации энергии потоков природных газов

С.Ф. Максимов, Е.Я. Петерс

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Optimization of the power characteristics of devices for regenerating natural gas flow energy

S.F. Maksimov, E.Ja. Peters

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

 e-mail: maccimov.s@mail.ru, petra-physik@mail.ru

i Создание возобновляемых источников энергии является актуальной проблемой современной энергетики. Приведен обзор схемных решений устройств возврата потенциально запасенной энергии движущихся дисперсных газоконденсатных потоков, служащих рабочим телом турбопреобразователей этой энергии в механическую, электрическую, тепловую или иную на газораспределительных станциях (ГРС), станциях подземного хранения газа и других объектах. Эффективность и перспективность разработки определяется созданием на указанных объектах собственных автономных источников бесперебойного питания электрической и тепловой энергии, работающих по принципу рекуперации. Это позволяет снизить или полностью исключить капитальные затраты на строительство дорогостоящих линий электропередач для обеспечения электроэнергией вновь создаваемых ГРС в системе «Трансгаз».

Ключевые слова: рекуперация, дисперсные газоконденсатные потоки, газораспределительная станция, рабочее тело, турбопреобразователь.

i Developing renewable sources of energy is the central problem of modern power engineering. An overview of the circuit designs of devices for recovering potential energy of dispersed two-phase flows is presented. The flows are considered to be working media in the turbines converting this form of energy into mechanical, electrical, thermal, or other form of energy at gas distribution stations (GDS), subsurface gas storage stations (SGSS), and other sites. Effective and promising development is provided by the creation of on-site independent trouble-free sources of electrical and thermal energy on the basis of the recovery principle. This makes it possible to reduce or eliminate the capital investments for the construction of expensive power lines to deliver electrical energy to newly created Transgaz GDS. The results of this work can be used in the energy, aviation, rocket and space, and oil and gas industries whose technical systems operate under complicated conditions. This is especially true when the systems use multiphase dispersed working media, which reduces their specific power and efficiency.

Keywords: regeneration, multiphase dispersed flow, gas distribution station, working media, turbine converter.

В настоящее время возобновляемые виды энергии являются одним из перспективных направлений научно-технического прогресса. К возобновляемым видам энергии относится использование солнечной, ветровой, тепловой, приливной энергии, а также разработка принципов возврата части энергии, затрачиваемой на транспортировку природных и попутных нефтяных газов по магистральным трубопроводам от источника до потребителя.

Распределение добываемой продукции в системе газопотребления осуществляется на газораспределительных станциях (ГРС) путем снижения давления магистрального газа до различного уровня в зависимости от типа потребителя и вида его нужд: жилой поселок, поселок городского типа, технический центр, газоперерабатывающий завод и т.п.

Особое место в системах энергообеспечения указанных объектов отводится мобильным источникам бесперебойного питания с функциями быстрого включения в работу при аварийных ситуациях и в качестве резервного или постоянно действующего источника электроэнергии. Этим требованиям отвечают источники электроэнергии, создаваемые на базе системы электрический генератор — газовая турбина, работающей на энергии газового потока при его дросселировании на газораспределительных магистралях (ГРМ). При этом роль дросселирующего устройства на ГРС может выполнять сопловой аппарат турбины. Оценочная мощность таких источников электроэнергии может составить от сотни ватт до сотен и тысяч киловатт.

Нормативным документом для разработки таких технических средств следует считать отраслевой стандарт, разработанный ООО «ВНИИГАЗ» [1].

Среди имеющихся разработок следует отметить турбоэлектрогенераторную детандорную установку ТЭГДУ-5-230/400 мощностью 5,0 кВт. Эта установка создана совместно ООО «Калугатрансмаш», ООО «Газоснабжение» и ОАО «Энергомера» в 2006 г. В данной энергоустановке вал турбины соединен с валом генератора через предохранительную муфту напрямую. Следовательно, скорость вращения вала турбины и генератора равны и составляют 3 000 об/мин. Недостатком этой установки является невысокая удельная мощность турбины из-за низкой относительной скорости вращения $U/C_{ад} < 0,15$ (U — окружная скорость; $C_{ад}$ — адиабатная скорость истечения газа из сопла турбины), и, как следствие, невысокий КПД

турбопреобразователя энергии газа и системы рекуперации установки в целом.

В 2010 г. по заданию ООО «Спецэнергогазстрой» и УК «ГАЗОСНАБЖЕНИЕ» в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Ракетные двигатели» были проведены теоретические и экспериментальные исследования указанного турбопреобразователя на модельном рабочем теле (воздух) и разработаны мероприятия по повышению эффективности такого класса устройств.

Среди разработок ООО «Турбохолд» известна турбогенераторная установка, а также опытно-модельные образцы ТЭГДА-0,3, ТЭГДА-10, ТЭГДА-300 мощностью 0,3, 10 и 300 кВт соответственно. Все эти устройства прошли предварительные испытания на обычных газопроводах.

В литературе отсутствуют данные по удельным мощностям, полученным экспериментально, а стоимость таких высокооборотных устройств существенно превышает стоимость ТЭГДУ-5. По неофициальным данным производителя этих установок максимальная стоимость одной из них могла составить более 15...20 млн руб.

Для согласования параметров турбины и электрогенератора по частоте вращения и обеспечению повышенных мер безопасности, ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ» разработал турбогенераторный агрегат УГРА-120 полезной мощности 100...120 кВт. Высокооборотная турбина этого устройства размещается в газовой магистрали, а электрогенератор вынесен наружу и связан с валом турбины через понижающий редуктор и систему уплотнений. Оценочная стоимость устройства составляет около 4 млн руб.

Особенностью эксплуатации турбогенераторных преобразователей энергии природных газовых потоков на ГРС и станциях подземного хранения газа (СПХГ) является то, что в составе этих газов могут присутствовать частицы механических примесей, пары воды и т.п. По данным ООО «Спецэнергогазстрой» со временем это приводит к значительным отложениям на стенках трубопроводов, к уменьшению проходных сечений газовых магистралей и увеличению их гидравлических сопротивлений.

Наличие конденсированных примесей в составе рабочего тела газотурбинных преобразователей энергии может существенно снизить их энергетическую эффективность и срок эксплуатации. По предварительным оценкам [2–4] снижение КПД турбогенератора-рекуператора может составить 1 % и более на 1 % содержания

конденсированных частиц в составе двухфазного рабочего тела турбины. Наличие в рабочем теле турбины конденсата по этим же данным может приводить к механическому износу сопловых и рабочих лопаток.

Цель работы — повышение энергетической эффективности преобразователей низкопотенциальной энергии природных газов на дисперсных потоках в составе ГРС или СПХГ.

Реализация указанной цели возможна за счет снижения негативного эффекта двухфазности, установки предтурбинных инерционных разделителей потока типа сепараторов [5, 6]. Параметры этих устройств существенно зависят от значительного количества факторов [7], что в сочетании с многообразием их конструктивных и схемных решений требует новых подходов к выбору оптимальных конструкций рекуператоров энергии. В частности, в работе [6] рассмотрен комплексный параметр η_c , определяющий эффективность применения сепарирующих устройств в составе турбо-силовых приводов, работающих на высокотемпературных дисперсных потоках, содержащих в своем составе конденсированные твердые частицы оксидов металлов и др.

Известно, что в отличие от условий работы турбины на природных газах, магистральный природный газ транспортировки имеет среднегодовую температуру, близкую к нормальным условиям $T_{г.ср} = 273...293$ К.

При расширении газа в сопловом аппарате турбин при одновременном отборе от расширяющегося газа механической работы имеет место турбо-детандерный эффект, приводящий к дополнительному снижению температуры рабочего газа, а при наличии в его составе влаги и к образованию наледи на поверхности сопловых аппаратов, лопаток и проточной части турбины, обуславливающий падение КПД и сбой нормальной работы агрегатов технической системы. Поэтому для создания надежных средств процесса рекуперации необходима разработка дополнительных мероприятий, нивелирующих указанный эффект, методик, критериев ее оценки и оптимизации энергетических и режимных параметров такого класса рекуператоров.

Учитывая изложенное выше, для достижения поставленной цели предварительно были сформулированы задачи предстоящих исследований:

1) разработать физическую и математическую модель совокупного рекуперационного устройства на базе предтурбинного инерцион-

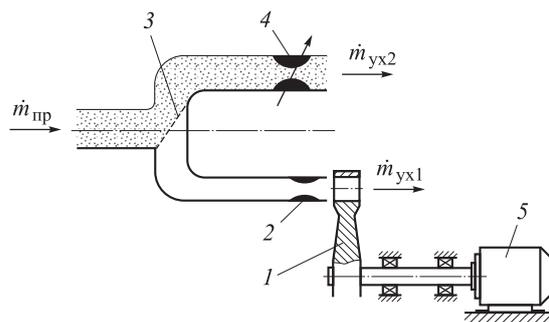


Рис. 1. Расчетная модель устройства рекуперации: 1 — трубопровод; 2 — сопло турбины; 3 — разделитель фаз; 4 — дроссель; 5 — электродвигатель

ного разделителя дисперсного потока и турбо-преобразователя энергии;

2) на основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований выявить параметр оптимизации рассматриваемых схем рекуператоров, обеспечивающий их максимальный КПД.

Для проведения расчетно-теоретического анализа и оптимизации устройств рекуперации была составлена расчетная модель, приведенная на рис. 1.

В соответствии с этим рисунком, дисперсный поток с известными параметрами на входе в рекуператор, состоящий из потока газа и взвешенных в нем механических частиц, поступает в инерционный разделитель фаз, где делится на два потока.

Первый поток (основной) выполняет роль источника рабочего тела турбины. Проходя через разделитель фаз, очищенный от конденсата, он поступает в сопловой аппарат турбины, затем в рабочее колесо и в магистраль к потребителю топливного газа. Энергия давления и расхода газа этого потока, потенциально запасенные в процессе компримирования на магистральных компрессорных станциях, преобразуются (в процессе дросселирования и детандирования на ГРС или СПХГ) в механическую энергию вращения турбины, которая передается через вал на электрогенератор, вырабатывающий электрический ток.

Второй поток, параллельный первому, в виде смеси небольшого количества газа и всего отсепарированного в разделителе конденсата транспортируется этим же газом для дальнейшей его утилизации посредством специальных сборников — отстойников и системы сброса. Принципиальная схема источника бесперебойного питания потребителей на ГРС или СПХГ на базе рекуператора с предтурбинным разделителем фаз (сепаратором и дополнительного

Суммарный дисперсный поток \dot{m}_{yx} после разделителя фаз разветвляется на два потока:

$$\dot{m}_{yx} = \dot{m}_{yx1} + \dot{m}_{yx2}. \quad (4)$$

Здесь \dot{m}_{yx1} — масса рабочего тела турбины, поступающего на ее вход после разделителя (сепаратора),

$$\dot{m}_{yx1} = \dot{m}_{yx.k1} + \dot{m}_{yx.g1}, \quad (5)$$

где $\dot{m}_{yx.k1}$ — масса конденсированной фазы в составе рабочего тела турбины, оставшейся после разделителя фаз; $\dot{m}_{yx.g1}$ — масса газовой фазы в составе рабочего тела турбины на ее входе; \dot{m}_{yx2} — масса уходящего дисперсного потока через отводящее устройство после разделителя, поступающего на утилизацию всего отсепарированного конденсата (в дальнейшем К-фаза), минуя турбину,

$$\dot{m}_{yx2} = \dot{m}_{yx.k2} + \dot{m}_{yx.g2}. \quad (6)$$

Здесь $\dot{m}_{yx.k2}$ — масса конденсированной фазы, поступающей через отводящее устройство после разделителя; $\dot{m}_{yx.g2}$ — масса газовой фазы, проходящей через отводящее устройство, необходимое для транспортировки на утилизацию отсепарированного в разделителе конденсата.

Введем параметр, характеризующий степень отделения рабочего тела турбины от конденсированной фазы (аналог коэффициента сепарации [6])

$$C_{от.к} = 1 - \frac{\dot{m}_{к.т}}{\dot{m}_{г.т} + \dot{m}_{к.т}}, \quad (7)$$

где $\dot{m}_{к.т}$ — массовый расход конденсированных частиц, прошедших через турбину в составе ее рабочего тела в единицу времени; $\dot{m}_{г.т}$ — массовый расход газовой фазы, прошедшей через турбину в составе ее рабочего тела в единицу времени.

Обозначим отношение параметров

$$\frac{\dot{m}_{к.т}}{\dot{m}_{г.т} + \dot{m}_{к.т}} = q_{к.т}. \quad (8)$$

Параметр $q_{к.т}$ — один из важнейших параметров, определяющий энергетическую эффективность и КПД преобразователя энергии природного газового потока.

По аналогии с (8) массовую долю газовой фазы в составе рабочего тела турбины в относительных величинах представим в виде отношения массового расхода газовой фазы рабочего тела турбины ко всему массовому расходу ее рабочего тела:

$$q_{г.т} = \frac{\dot{m}_{г.т}}{\dot{m}_{г.т} + \dot{m}_{к.т}}. \quad (9)$$

Следует отметить, что данный параметр, определяющий энергетику рассматриваемых систем, связан с потерями рабочего тела турбины, поступающего на постоянное удаление конденсата из зоны разделения дисперсного потока методом пневмотранспорта в режиме псевдооживления. Такой режим течения обеспечивает минимизацию газа транспортировки и снижение потерь газовой части рабочего тела турбины [7, 8].

Как отмечалось выше, остаточное содержание конденсата в составе рабочего тела турбопреобразователя энергии снижает его КПД. Уменьшение ее количества с помощью предтурбинных разделителей фаз методом инерционной сепарации, в свою очередь, требует безвозвратных затрат рабочего газа на транспортировку и утилизацию отсепарированной К-фазы.

Из приведенных выше соотношений следует, что задача оптимизации рекуператоров энергии в системах «Трансгаз» определяется тремя взаимосвязанными между собой параметрами: коэффициентом отделения $C_{от.к}$, остаточным содержанием конденсированной фазы (К-фазы) $q_{к.т}$ в составе рабочего тела турбины и долей утечек рабочего газа $q_{г.у}$ на транспортировку и утилизацию отсепарированной К-фазы.

Газ транспортировки К-фазы характеризуется прямыми потерями «газовой части» рабочего тела турбины рекуператора $\dot{m}_{г.ут}$, поскольку не участвует в создании полезной работы турбопривода электрогенератора. В относительных величинах выражение для этого параметра можно представить в следующем виде:

$$q_{г.у} = \frac{\dot{m}_{г.ут}}{\dot{m}_{г.ут} + \dot{m}_{к.ут}}, \quad (10)$$

где $\dot{m}_{к.ут}$ — массовое содержание отсепарированной К-фазы в составе двухфазного потока для ее транспортировки и утилизации.

Для решения задачи оптимизации параметров рекуператора энергии природного газа на ГРС кроме системы уравнений (1)–(10) должна быть известна аналитическая или опытная зависимость степени «очистки» рабочего тела турбины от конденсата и доли утечек газа на его транспортировку.

В теоретическом плане определить взаимосвязь между указанными параметрами в явном виде представляется достаточно сложной задачей из-за различия схемных и конструктивных решений разделителей фаз. Однако, используя существующие подходы к решению пневмотранспортных задач, возможно выявить некоторые общие качественные закономерности про-

текания этих зависимостей, например, зависимости $C_{от.к} = F(q_{г.ут})$.

В литературе [8, 9] указано, что в процессе пневмотранспорта твердых частиц газами в состоянии псевдооживления имеют место три характерных режима:

1) режим плотного заторможенного слоя, соответствующий ламинарному течению газа в пористой структуре с большим содержанием конденсата и малым содержанием и расходом газа транспортировки при значительных перепадах давления (режим поршневого течения);

2) переходный режим течения от ламинарного к турбулентному со слабо возрастающим расходом газа в условиях переменной порозности и перепада давления;

3) режим все возрастающего расхода газа и несущего им твердого конденсата с признаками автомодельного течения.

Качественная картина протекания этих характерных режимов в виде зависимости относительного содержания газа ($q_{г.д}$) в составе дисперсного потока для реализации каждого из трех указанных режимов течения в функции потребного количества газовой фазы ($q_{г.рт}$), затрачиваемой на транспортировку К-фазы, представлена на рис. 3. По приведенной зависимости можно выявить общую математическую связь между указанными параметрами. Аппроксимация приведенной кривой может быть описана следующим уравнением:

$$q_{г.д} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left(C_1 \frac{q_{г.тр}}{1 - q_{г.тр}} \right), \quad (11)$$

где C_1 — константа, определяющая кривизну переходного участка от начального участка

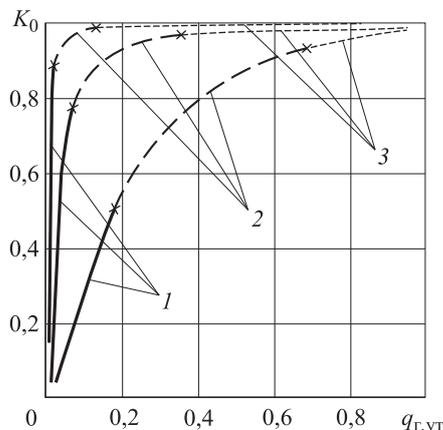


Рис. 3. Графическая интерпретация картины течения псевдооживленного двухфазного потока для различных режимов течения:

1 — ламинарный; 2 — переходный; 3 — автомодельный; x — условная граница переходного режима

кривой к конечному участку (т. е. в области течения двухфазного потока от ламинарного к турбулентному и автомодельному режимам по числу Рейнольдса); $q_{г.тр}$ — массовая доля газа, поступающего на транспортировку отсепарированного газа.

Конкретизируя физическую модель рекуператора, произведем замену переменных в уравнении (11). Переменную $q_{г.д}$ заменим на ее аналог $C_{от.к}$, характеризующий степень очистки рабочего тела турбины от К-фазы (коэффициент сепарации), а переменную $q_{г.тр}$ заменим на ее аналог $q_{г.у}$ (утечки рабочего газа турбины на транспортировку отсепарированного конденсата).

Для соблюдения масштабности константу C_1 заменим на константу C_2 . Тогда уравнение (11) принимает следующий вид:

$$C_{от.к} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left(C_2 \frac{q_{г.ут}}{1 - q_{г.ут}} \right). \quad (12)$$

Для оценки доли утечек газа, затрачиваемых на транспортировку отсепарированного конденсата, в зависимости от требуемой степени отделения рабочего тела турбины от конденсата представим уравнение (12) в более удобном для анализа виде:

$$q_{г.ут} = \frac{A}{A + \operatorname{tg}(\pi/2) C_{от.к}}, \quad (13)$$

где A — константа, характеризующая степень совершенства предтурбинных сепарирующих устройств.

Рассчитанная по уравнению (13) зависимость для различных значений константы A , физически характеризующей степень совершенства разделителей рабочего потока турбопреобразователей энергии потока природного газа, представлена на рис. 4.

С целью подтверждения теоретической функциональной связи между долей утечек газа на транспортировку отсепарированного конденсата и параметром $C_{от.к}$ предварительно был проведен эксперимент на специализированном стенде учебно-экспериментального центра МГТУ им. Н.Э. Баумана. Описание этого стенда приведено в работе [10].

Основные элементы стенда: источник компримированного воздуха с возможностью регулирования его расхода, давления и температуры, порошковый питатель с бункером для создания двухфазного потока с требуемыми параметрами, система вытеснения порошкообразной К-фазы в поток осушенного и подогретого воздуха, система контроля и измерения

параметров двухфазного потока. Особенностью экспериментального участка стенда является возможность улавливания практически всего количества конденсированных частиц перед и после разделителя фаз и турбопривода.

Требуемая точность измерения параметров двухфазного потока достигалась с помощью системы циклонов и фильтров, последовательно включенных в гидравлические и газодинамические тракты устройства разделения фаз и проточный части турбопреобразователя на их входе и выходе. Нагрузка последнего моделировалась заменой электрогенератора на гидравлический насос центробежного типа.

Эксперименты проводились на двухфазных потоках (воздух с различными видами конденсированной фазы). В качестве разделителей дисперсных потоков использовались несколько типов устройств, начиная от газодинамических сепараторов с инерционным разделением фаз до фильтров.

Роль модельной К-фазы выполняли речной кварцевый песок и порошок диоксида алюминия, просеиваемые на ситах с различными размерами сетчатой ячейки. Это позволяло в испытаниях задавать исходные среднегеометрические размеры частиц конденсата в диапазоне от 2...10 до 200...500 мкм. Натурный природный газ в испытаниях заменялся модельным рабочим телом в виде подогретого до положительных температур сжатого воздуха. Режимные параметры воздуха и конденсата выбирались близкими по давлению, расходам, концентрации К-фазы и температуре к условиям на ГРС или СПХГ. Это позволит в дальнейшем использовать полученные результаты для выбора и назначения оптимальных режимов эксплуатации рекуператоров с максимальным КПД возврата энергии транспортируемых природных газов.

Результаты испытаний, а также зависимости доли утечек газа ($q_{г.ут}$) на транспортировку отсепарированных твердых частиц и типа газодинамических разделителей фаз от степени отделения К-фазы от рабочего тела турбины представлены на рис. 4. Результаты исследований позволили выявить параметр оптимизации $C_{от.к}$, характеризующий эффективность применения предтурбинных разделителей фаз в составе рекуператоров и, как будет показано ниже, с его помощью выработать критерий оптимизации режимных параметров устройств для возврата части энергии транспортируемых природных газов на ГРС с максимальным КПД.

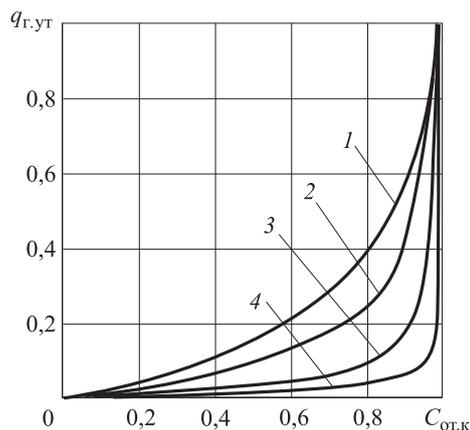


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная зависимость доли утечек газа на транспортировку отсепарированной К-фазы от степени очистки рабочего тела турбины:
1 — $A = 5$; 2 — $A = 19$;
3 — $A = 40$; 4 — $A = 100$

Параметр $C_{от.к}$ связан с постоянной C_2 в уравнении (12): чем больше значение безразмерной константы C_2 , тем меньшей долей утечек газа транспортировки отсепарированного конденсата достигается требуемая степень отделения К-фазы от газовой части рабочего тела турбопреобразователя энергии газового потока.

Рассматривая параметр $C_{от.к}$ в качестве эталона, можно подбирать или настраивать требуемые характеристики сепараторов в качестве предтурбинных разделителей фаз по их типу и характеристикам, опираясь на справочную информацию, например [11], или другую.

Кроме того, с помощью параметра $C_{от.к}$ удалось выявить более важный определяющий безразмерный параметр $\eta_{опт}$, который можно рассматривать как критерий оптимизации энергетических характеристик устройств рекуперации энергии потоков природных газов в процессе газораспределения на станциях Газпрома.

С точки зрения эффективности использования энергетических характеристик рабочего тела турбопривода данный критерий оптимизации связан с двумя зависимыми параметрами: долей утечек рабочего газа турбины на транспортировку отсепарированного конденсата $q_{г.ут}$ и остаточного содержания К-фазы в составе рабочего тела турбины $q_{к.т}$:

$$\eta_{опт} = (1 - q_{к.т})(1 - q_{г.ут}). \quad (14)$$

Анализ выполненных теоретических и экспериментальных исследований показывает, что с увеличением степени очистки рабочего тела турбины от конденсата уменьшаются потери на двухфазность, снижающие ее КПД, однако при

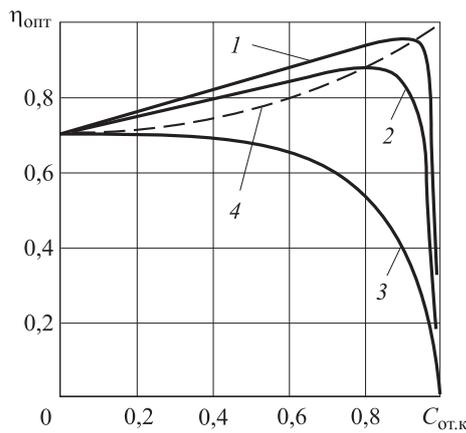


Рис. 5. Зависимость критерия оптимизации энергетических характеристик устройств рекуперации в функции степени очистки рабочего тела от конденсата $C_{от.к}$:

- 1 — вращающийся разделитель фаз;
- 2 — центробежно-жалюзийный разделитель фаз;
- 3 — струйный разделитель фаз с разворотом потока;
- 4 — линия максимальных значений параметра эффективности $\eta_{опт}(C_{от.к})$

этом возрастают потери газовой части рабочего тела турбины. И наоборот, с уменьшением затрат рабочего газа на транспортировку отсепарированного конденсата возрастает его содержание в составе рабочего тела турбины, что также снижает эффективность применения рекуператоров.

Очевидно существует компромиссное решение этого вопроса оптимизацией режимных параметров рассматриваемых устройств. Для проведения оптимизации выразим параметры в уравнении (14) через относительное массовое содержание газовой и конденсированной фаз на его входе и по газовому тракту устройства.

Обозначим массовую долю газовой фазы на входе в рекуператор $q_{г.вх}$, а долю конденсированной — $q_{к.вх}$. Тогда массовая доля конденсата, оставшегося в составе рабочего тела турбины рекуператора в функции этих параметров, а также коэффициента сепарации и массовой доли утечек газа на транспортировку К-фазы может быть представлена в следующем виде:

$$q_{к.т} = \frac{1 - q_{г.ут}}{(1 - q_{г.ут})q_{г.вх} + (1 - C_{от.к})(1 - q_{г.вх})}. \quad (15)$$

Подставив уравнение (15) в (14), перепишем критерий оптимизации в виде

$$q_{к.т} = \frac{1 - q_{г.ут}}{(1 - q_{г.ут})q_{г.вх}} \cdot \left(1 - \frac{1 - q_{г.ут}}{(1 - q_{г.ут})q_{г.вх} + (1 - C_{от.к})(1 - q_{г.вх})} \right). \quad (16)$$

Для поиска максимума рассматриваемого параметра приравняем нулю производную:

$$\frac{d\eta_{опт}}{dC_{от.к}} = \frac{q_{г.вх}q_{г.ут}}{\left[(1 - C_{от.к})(1 - q_{г.вх}) + q_{г.вх}q_{г.ут} \right]^2} \times \\ \times 2 \left[(1 - C_{от.к})(1 - q_{г.вх}) + q_{г.вх}q_{г.ут} - 1 + \right. \\ \left. + \operatorname{tg} 2\pi \cdot 2A\pi \cdot 2A + \operatorname{tg}\pi \cdot 2C_{от.к} \cdot 2 + \right. \\ \left. + q_{г.ут}(1 - q_{г.вх}) \right] = 0. \quad (17)$$

Используя выражение (13), получим значение производной в уравнении (17):

$$\frac{dq_{г.ут}}{dC_{от.к}} = - \frac{\left[1 + \operatorname{tg}^2(\pi/2) \right] A(\pi/2)}{\left[A + \operatorname{tg}(\pi/2)C_{от.к} \right]^2}. \quad (18)$$

Окончательно условие максимума параметра оптимизации имеет вид

$$\eta_{опт \max} = \frac{q_{г.вх}q_{г.ут}}{\left[(1 - C_{от.к})(1 - q_{г.вх}) + q_{г.вх}q_{г.ут} \right]^2} \times \\ \times \left[(1 - C_{от.к})(1 - q_{г.вх}) + q_{г.вх} + q_{г.ут} - 1 + \right. \\ \left. + \operatorname{tg} 2\pi \cdot 2C_{от.к} A\pi \cdot 2A + \right. \\ \left. + \operatorname{tg} \pi \cdot 2C_{от.к} + q_{г.ут} - (1 - q_{г.вх}) \right]. \quad (19)$$

Расчетные зависимости параметра $\eta_{опт}$ в функции степени очистки рабочего тела турбопривода от конденсата $C_{от.к}$ для инерционных разделителей фаз с различной сепарационной способностью представлены на рис. 5. Здесь же приведена кривая 4, соответствующая оптимальным значениям параметров рекуператора на оптимальных режимах работы в составе разделителей фаз типа: криволинейный канал, разворот потока на 180° и центробежный жалюзийный сепаратор, в которых параметр A соответствовал приближенным значениям 5, 40 и 100 в координатах $\eta_{опт} = f(C_{от.к})$.

Исследования показали, что отклонение от оптимальных режимов работы, определяемых уравнениями (11)–(19), приводит к снижению КПД рекуператоров примерно по параболической зависимости, причем, чем выше степень совершенства разделителей фаз, тем выше градиент этого снижения.

Выводы

1. Разработаны принципы повышения КПД устройств рекуперации энергии транспортных потоков природных газов на ГРС и СПХГ с помощью оптимизации режимных параметров

турбоприводов с предтурбинными разделителями рабочего тела от К-фазы.

2. Уточнен критерий оптимизации парамет-

ров совокупного устройства возврата потенциально запасенной энергии компримирования природных газов в системе «Трансгаз».

Литература

- [1] *Технические требования к системам электроснабжения ГРС*. СТО Газпром 2-1.11-081-2006. 21 с.
- [2] Максимов С.Ф., Сурмилин А.Д., Арефьев К.Ю. Аналитический обзор и оценка энергетической эффективности применения различных турбогенераторных источников электроэнергии на ГРС. *Материалы Всесоюз. науч.-техн. конф. Ракетно-космические ДУ*. Москва, 2010, с. 91—92.
- [3] Венедиктов В.Д. *Турбины и реактивные сопла на двухфазных потоках*. Москва, Машиностроение, 1969. 195 с.
- [4] Максимов С.Ф. *Изучение энергетических характеристик активной турбины на модельном однофазном и двухфазном рабочем теле*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 46 с.
- [5] Андреев Е.А., Бобров А.Н., Максимов С.Ф. Проблемы сепарации высокотемпературного многофазного потока и схемы сепарирующих устройств. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/702.html> (дата обращения 28 апреля 2014).
- [6] Андреев Е.А., Бобров А.Н., Максимов С.Ф. Эффективность применения сепарирующих устройств в энергетических установках на металлизированных топливах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/703.html> (дата обращения 28 апреля 2014).
- [7] Винниченко В.И., Котляренко В.В., Бабинцев А.В. Скорость витания частиц и коэффициент для определения скорости газового потока. *Вестник национального технического университета «ХПИ»*, 2008, вып. 38, с. 102—112.
- [8] Власов Ю.Н., Шацкий О.Е. Особенности расчета системы подачи псевдооживленного металлического горючего в режиме заторможенного плотного слоя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/708.html> (дата обращения 28 апреля 2014).
- [9] Разумов И.М. *Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов*. Москва, Химия, 1972. 240 с.
- [10] Чернов В.А., Сухов А.В., Федотова К.В. Термопескоструйные аппараты на основе углеводородно-воздушных газогенераторов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/700.html> (дата обращения 28 апреля 2014).
- [11] Бригер М.И. *Справочник по пыле- и золоулавливанию*: Москва, Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

References

- [1] *Tekhnicheskie trebovaniia k sistemam elektrosnabzheniia GRS* [Technical requirements for power supply systems GDS]. STO Gazprom 2-1.11-081-2006. 21 p.
- [2] Maksimov S.F., Surmilin A.D., Arefev K.Iu. *Analiticheskii obzor i otsenka energeticheskoi effektivnosti primeneniia razlichnykh turbogeneratornykh istochnikov elektroenergii na GRS* [Analytical review and evaluation of the energy efficiency of different energy sources turbogenerator at GDS]. *Materialy Vsesoiuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Raketno-kosmicheskie DU»* [Materials of All-Union Scientific-Technical Conference «Space-rocket DU»]. Moscow, 2010, pp. 91—92.
- [3] Venediktov V.D. *Turbiny i reaktivnye sopla na dvukhfaznykh potokakh* [Turbines and jet nozzle for two-phase flows]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1969. 195 p.
- [4] Maksimov S.F. *Izuchenie energeticheskikh kharakteristik aktivnoi turbiny na model'nom odnofaznom i dvukhfaznom rabochem tele* [Study of the energy characteristics of the impulse

- turbine with a model single-phase and two-phase working fluid]. Moscow, Bauman Press, 2011. 46 p.
- [5] Andreev E.A., Bobrov A.N., Maksimov S.F. Problemy separatsii vysokotemperaturnogo mnogofaznogo potoka i skhemy separiruiushchikh ustroystv [Problems of high-temperature multi-phase flow separation and schemes of separating devices]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation electronic science and engineering publication]. 2013, issue 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/702.html> (accessed 28 April 2014).
- [6] Andreev E.A., Bobrov A.N., Maksimov S.F. Effektivnost' primeneniia separiruiushchikh ustroystv v energeticheskikh ustanovkakh na metallizirovannykh toplivakh [Operating efficiency of separating devices in the power plants which use metallized fuels]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation electronic science and engineering publication]. 2013, issue 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/703.html> (accessed 28 April 2014).
- [7] Vinnichenko V.I., Kotliarenko V.V., Babintsev A.V. Skorost' vitanii chastits i koeffitsient dlia opredeleniia skorosti gazovogo potoka [Fall velocity of the particles and the coefficient for determining the gas flow rate]. *Vestnik natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KPI»* [Bulletin of the National Technical University «KPI»]. 2008, issue 38, pp. 102—112.
- [8] Vlasov Iu.N., Shatskii O.E. Osobennosti rascheta sistemy podachi psevdoozhizhennogo metallichesкого goriuchego v rezhime zatormozhennogo plotnogo sloia [Calculation features of the supply system of fluidized metal fuel in the flow regime of the retarded dense layer]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation electronic science and engineering publication]. 2013, issue 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/708.html> (accessed 28 April 2014).
- [9] Razumov I.M. *Psevdoozhizhzenie i pnevмотransport sypuchikh materialov* [Fluidization and pneumatic transport of bulk materials]. Moscow, Khimiia publ., 1972. 240 p.
- [10] Chernov V.A., Sukhov A.V., Fedotova K.V. Termopeskostruinye apparaty na osnove uglevodorodno-vozdushnykh generatorov [Thermal sandblasters of hydrocarbon-air gas generators]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation electronic science and engineering publication]. 2013, issue 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/700.html> (accessed 28 April 2014).
- [11] Briger M.I. *Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniiu* [Handbook of dust and ash removal]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1983. 312 p.

Статья поступила в редакцию 20.05.2014

Информация об авторах

МАКСИМОВ Станислав Федорович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: maksimov.s@mail.ru).

ПЕТЕРС Екатерина Яковлена (Москва) — инженер НИИ ЭМ. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: petra-physik@mail.ru).

Information about the authors

MAKSIMOV Stanislav Fedorovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: maksimov.s@mail.ru).

PETERS Ekaterina Yakovlena (Moscow) — Engineer of Research Institute «Power Plant Engineering». Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: petra-physik@mail.ru).