

ет большую макроскопическую однородность структуры и подавление дендритообразования.

## 5. Выводы

Более детальный анализ показал преимущество резонансного режима фонового акустического воз-

действия перед штатным режимом. Исследования структурных и эксплуатационных отливок в резонансном режиме фонового акустического воздействия в настоящее время продолжают. Сегодня накоплен обширный экспериментальный материал, не вызывающий сомнений в возможности существенного влияния, как на кинетические параметры, так и на свойства продуктов неравновесных физико-химических процессов.

## Литература

1. Физико-химическая механика дисперсных структур в магнитных полях [Текст] / Под ред. Н.Н. Круглицкого. – Киев: Наук. Думка, 1976. – 193 с.
2. Фрадков, Л.А. Управление молекулярными и квантовыми системами [Текст] / Л.А. Фрадков; под ред. О.А. Якубовского. – М. – Ижевск: ИКИ, 2003. – 416 с.
3. Фомин, В.П. Влияние механических воздействий на формирование свойств многокомпонентных систем [Текст] / В.П. Фомин; Научный центр нелинейной волновой механики и технологии. – М.: Наука, 2004. – 82 с.
4. Клингер, Л.М. Диффузия и гетерофазные флуктуации [Текст] / Л.Г. Клингер // Металлофизика. - 1984. - Т.6. - №5. - С. 11-18.
5. Сурду, Н.В. Пути повышения эффективности процессов резания труднообрабатываемых материалов/Н.В. Сурду, А.А. Тарелин, В.В. Романов, А.Г. Фистик//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. –№2. – С. 9 – 17.
6. Зарембо, В.И. Фоновое резонансно-акустическое управление гетерофазными процессами [Текст] / В.И. Зарембо, А.А. Колесников // Теоретические основы химической технологии -2006. - Т.40. - №5. - С. 520-532.
7. Поезжалов, В.М. Кинетика электромагнитного излучения, сопровождающее массовую кристаллизацию [Текст] / В.М. Поезжалов // Тезисы доклада IX научной конференции по росту кристаллов. - М. - 2000. - 368 с.

*Наведено результати дослідження енергоефективності газотурбінних двигунів (ГТД) з блокованою силовою турбіною, ускладнених застосуванням турбіни перерозширення (ТП) і регенерацією теплоти (Р). Показана можливість поєднання двох способів підвищення економічності ГТД і застосування ГТД з ТП і Р як в енергетиці, так і в газоперекачувальних агрегатах засобів освоєння шельфу – нафтогазовидобувних платформ*

*Ключові слова: газотурбінний двигун, блокована силова турбіна, турбіна перерозширення, регенерація теплоти, турбокомпресорний утилізатор*

*Приведены результаты исследования энергоэффективности газотурбинных двигателей (ГТД) с заблокированной силовой турбиной, усложненных применением турбины перерасширения (ТП) и регенерацией теплоты (Р) выхлопных газов. Показана возможность сочетания двух способов повышения экономичности ГТД и применения ГТД с ТП и Р, как в энергетике, так и в газоперекачивающих агрегатах средств освоения шельфа – нефтегазодобывающих платформ*

*Ключевые слова: газотурбинный двигатель, заблокированная силовая турбина, турбина перерасширения, регенерация теплоты, турбокомпрессорный утилизатор*

УДК 621.438

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ПРИВОДНЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С БЛОКИРОВАННОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ

**В. Т. Матвеев**

Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник\*  
E-mail: mvvt39@ukr.net

**В. А. Очеретяный**

Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: ocheret-1961@rambler.ru

**А. Г. Андриец**

Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: andriets1@mail.ru

\*Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений

Севастопольского национального технического университета  
ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, Украина, 99053

## 1. Введение

Разработка новых газотурбинных двигателей (ГТД) и их производство требует значительных интеллектуальных, материальных и временных затрат. Поэтому даже в ведущих странах, владеющих достаточным научным потенциалом и технологиями производства ГТД, прослеживается тенденция унификации в создании новых образцов газотурбинной техники в авиации и кораблестроении, а на их базе – производство промышленных газотурбинных установок (ГТУ), в том числе для газотранспортных систем. Такие ГТУ построены в основном по многовальнй схеме со свободной силовой турбиной.

Энергетические ГТД предпочтительно создавать по одновальной схеме с заблокированной силовой турбиной, которая обеспечивает стабильность и качественную поставку электроэнергии в муниципальной и промышленной энергетике. Такие ГТУ также приспособлены для комбинированного производства энергии с высоким теплотехническим (общим) КПД.

Более простая конструкция одновальной турбокомпрессорной части двигателя, достаточно высокий КПД при умеренных температурах газа и применение регенерации теплоты, делает актуальным вопрос использования указанной схемы двигателя в качестве приводного в определенной области.

## 2. Направления повышения эффективности ГТД с заблокированной силовой турбиной

В соответствии с поставленной проблемой повышения энергоэффективности энергетических и приводных ГТД необходимо повысить КПД и удельную мощность ГТД при умеренных начальных температурах газа в двигателе. Такая задача в основном решается за счет применения сложных термодинамических циклов двигателей.

На первом этапе усложнение простого цикла ГТД предлагается провести путем введения регенерации теплоты выхлопных газов двигателя [1, 2] для подогрева сжатого в компрессоре воздуха перед камерой сгорания.

Усложнение простого цикла ГТД возможно произвести также нетрадиционным способом посредством перерасширения газа на выходе из силовой турбины [3], что позволяет получить за вычетом энергии на дожимание газа в дожимающем компрессоре дополнительную работу, которая повысит КПД и удельную мощность двигателя.

На втором этапе получения сложного термодинамического цикла в тепловую схему ГТД с турбиной перерасширения вводится регенерация теплоты газов за турбиной перерасширения, что позволяет осуществить более глубокую утилизацию теплоты в цикле.

Таким образом, задачей исследований энергоэффективности термодинамических циклов является определение характеристик и параметров циклов энергетических и приводных ГТД с заблокированной силовой турбиной, как на номинальных нагрузках, так и на переменных режимах, характерных для работы ГТД в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в системе магистральных газопроводов и средств освоения шельфа.

## 3. Характеристики ГТД сложных циклов с заблокированной силовой турбиной на номинальных режимах нагружения

С целью исследования параметров и основных характеристик цикла ГТД с регенерацией теплоты и цикла ГТД с турбиной перерасширения их можно представить в виде цикла Брайтона, последовательно усложненного путем введения регенерации теплоты, и цикла ГТД, где применен турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ), который состоит из турбины перерасширения (ТП), дожимающего компрессора (ДК) и охладителей газа между ними ТТ и КУ (рис. 1).

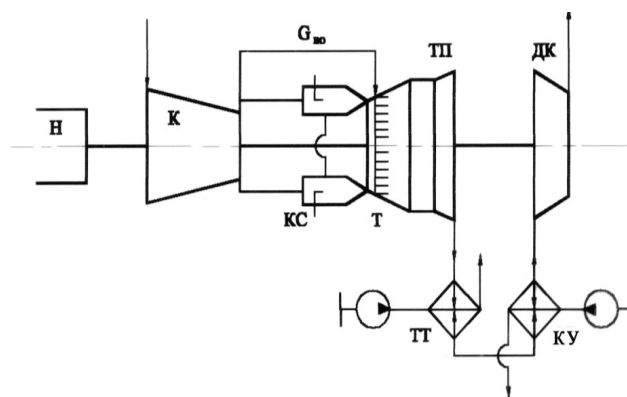


Рис. 1. Схема ГТД с турбокомпрессорным утилизатором: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; ТТ – теплофикационный теплообменник; Н – нагрузка; КУ – котел-утилизатор

Для анализа циклов ГТД применена универсальная термодинамическая модель цикла ГТД [4], которая позволяет определять параметры цикла при изменении величины степени повышения давления в компрессоре двигателя  $\pi_k$ , начальной температуры газа  $T_3$ , а также изменения величины степени регенерации  $\sigma$  и степени повышения давления в дожимающем компрессоре  $\pi_{dk}$  и фиксированных значениях других величин, влияющих на параметры цикла двигателя.

На рис. 2 показаны зависимости эффективного КПД ( $\eta_e$ ) и удельной мощности ( $n_{уд}$ ) циклов ГТД с регенерацией теплоты от изменения  $\pi_k$  при степени регенерации  $\sigma = 0,85$  и начальной температуре газа  $T_3 = 1373$  К.

Для сравнения приводятся параметры простого цикла ГТД (кривая П), которые определяются при степени регенерации  $\sigma = 0$  и  $\pi_{dk} = 1$ . Обозначение для цикла ГТД с регенерацией теплоты принято Р.

Анализ результатов исследования в диапазоне температур  $T_3 = 1273 \dots 1573$  К с шагом 50 К показал – увеличение КПД  $\eta_e$  для цикла ГТД с регенерацией теплоты составляет (относительно) 10...12,5 % по отношению к циклу Брайтона.

Удельная мощность в цикле ГТД с Р во всем диапазоне изменения  $\pi_k$  несколько меньше, чем в простом цикле, и максимальное значение ее находится не в зоне  $\pi_{kopt}$ . Это ведет к увеличению расхода и удельных

объемов рабочего тела и, следовательно, к увеличению массо-габаритных характеристик двигателя.

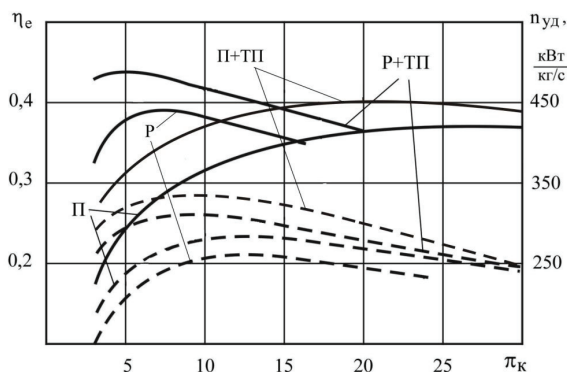


Рис. 2. Зависимости эффективного КПД ( $\eta_e$ ) (сплошные линии), и удельной мощности  $n_{уд}$  (прерывистые линии) от  $\pi_k$  при  $T_3 = 1373$  К,  $\sigma = 0,85$  и  $\pi_{дк} = 2,0$

Характеристики циклов ГТД с турбиной перерасширения определялись с учетом изменения  $\pi_{дк}$ , температура газа перед дожимающим компрессором принята равной 323 К.

Из представленных зависимостей на рис. 2 видно, что увеличение эффективного КПД  $\eta_e$  и удельной мощности  $n_{уд}$  для цикла ГТД с ТП составляет (относительно) в пределах 10...15 % по отношению к циклу Брайтона.

Наибольшее значение удельной мощности в циклах ГТД с ТП смещено в сторону меньших  $\pi_k$ , а оптимальное  $\pi_{дкорт}$  составляет 2,0...2,5.

Как приводные, ГТД с Р и ГТД с ТП, у которых эффективные КПД практически равны, могут рассматриваться как два способа повышения экономичности ГТД. Сочетание двух способов повышения экономичности ГТД применено в цикле ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты (ГТД с ТП и Р). Конструктивно эта схема реализуется встраиванием регенератора после ТП в ТКУ и представлена на рис. 3.

Исследования параметров циклов ГТД с ТП и Р проводились при изменении степени повышения давления  $\pi_{дк}$  в ДК в диапазоне от 1,75 до 2,5, температура газа перед ДК принята равной 323 К.

На рис. 2 показаны зависимости эффективного КПД  $\eta_e$  и удельной мощности  $n_{уд}$  от  $\pi_k$  в компрессоре газогенератора двигателя при  $\pi_{дк} = 2,0$  и степени регенерации  $\sigma = 0,85$  для цикла ГТД с ТП и Р (ТП+Р) в сравнении с простым циклом Брайтона (П) и циклом ГТД с Р. Из представленных зависимостей параметров на рис. 2 видно, что увеличение КПД для цикла ГТД с ТП и Р составляет 20...25 % относительно по отношению к простому циклу, значения удельной мощности значительно превышают величины для ГТД с Р. Оптимальная по КПД  $\pi_{корт}$  в цикле ГТД с ТП и Р составляет 4...6, что обеспечивает более высокий КПД компрессора.

Наибольшие значения удельной мощности в циклах ГТД с ТП и Р максимально приближены к  $\pi_{корт}$  по КПД, а  $\pi_{дкорт}$  составляет 1,8...2,2, что благоприятно сказывается при проектировании на массогабаритные характеристики теплообменного оборудования ТКУ.

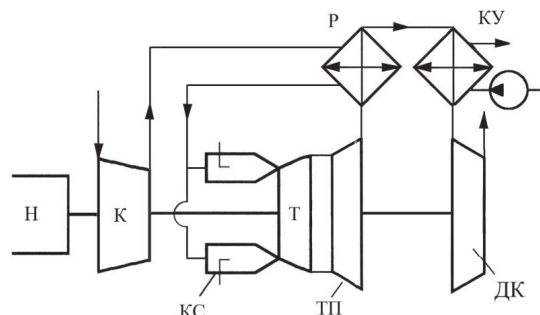


Рис. 3. Схема ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты

По уровню экономичности ГТД с ТП и Р находится в одном ряду с ГТД «Надежда» Невского завода и WR-21 фирмы Rolls-Royce и является к тому же ГТУ когенерационного типа.

#### 4. Характеристики ГТД сложных циклов с блокированной силовой турбиной на переменных режимах

Для когенерационных ГТУ, обеспечивающих энергией коммунальные и промышленные объекты, характерна работа на частичных нагрузках, поэтому выбор оптимальной тепловой и конструктивной схемы установки для работы ее при переменном режиме является важным эксплуатационным фактором.

ГТУ с ТКУ могут быть созданы на базе отечественных и зарубежных ГТД (фирмы Solar, Rolls-Royce и др.) и найдут также применение для обеспечения энергией морских буровых платформ (МБП), как плавучих, так и стационарных, для разведки и добычи нефти и газа, а также обеспечения энергией портово-промышленных зон.

В условиях эксплуатации на объектах освоения шельфа энергоустановка должна обладать хорошей приемистостью для обеспечения стабильности поставляемой электроэнергии, а также эксплуатационной надежностью. Одновалный энергетический ГТД, работающий при постоянных числах оборотов, удовлетворяет указанным требованиям, а применение ТКУ обеспечивает повышение экономичности ГТУ и выработку тепловой энергии для общесудовых потребителей [6].

ГТД в газоперекачивающем агрегате (ГПА) в составе компрессорной станции магистрального газопровода (МГ) работает при различных видах нагружения [7]: генераторном нагружении, а также по винтовой характеристике.

Характеристики и свойства ГТД с блокированной силовой турбиной (схема 1Б без регенерации) и с регенерацией (схема 1Б/Р) были изучены ранее [8, 9]. Элементы схем 1Б и 1Б/Р устойчиво работают при постоянном числе оборотов (генераторной нагрузке), а также по закону винта (винтовой нагрузке) в требуемом диапазоне нагружения  $\bar{N}_e = 1,0...0,5$ .

На рис. 4 и 5 показаны зависимости характеристик ГТД с регенерацией теплоты (схема 1Б/Р) и ГТД с ТКУ и Р (схема 1Б/Р+ТП) при генераторном и винто-

вом (обозначение V) нагружении. Во всех схемах вал турбокомпрессора заблокирован с силовой турбиной. Здесь приняты условные обозначения:  $\eta$  – КПД;  $T$  – температура;  $\pi$  – степень повышения давления;  $\bar{N}$  – относительная мощность;  $\bar{G}$  – относительный расход. Индексы: к – компрессор; dk - дожимающий компрессор; e – эффективный; tt – теплотехнический.

При всех значениях относительной мощности  $\bar{N}_e$  эффективный КПД  $\eta_e$  в схеме ГТД с Р и ТП выше, чем в ГТД с Р при всех видах нагружения (рис. 4). При винтовом нагружении КПД для всех схем выше, чем при генераторном нагружении, так как расход воздуха  $\bar{G}_k$  на переменном режиме через компрессор уменьшается и, таким образом, реализуется количественный закон регулирования.

На частичных нагрузках каждая схема ГТД имеет свои закономерности изменения теплотехнических характеристик (рис. 5). Теплотехнический (общий) КПД  $\eta_{tt}$  в ГТД с Р и ТП более высокий и практически стабильный на всех режимах нагружения и, соответственно, более стабильная относительная тепловая мощность  $\bar{N}_{tt}$ , что полезно при работе ГТУ в когенерационном режиме.

Заброс начальной температуры газа  $T_3$  во всех рассматриваемых циклах ГТД на частичных нагрузках не наблюдается.

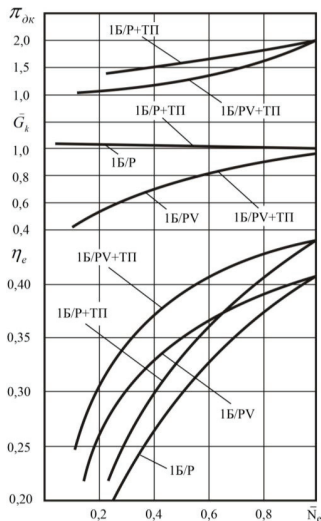


Рис. 4. Характеристики циклов ГТД на частичных нагрузках при  $T_3=1373$  К,  $\pi_k = 5-6$ ,  $\pi_{dk} = 2,0$  и  $\sigma=0,85$

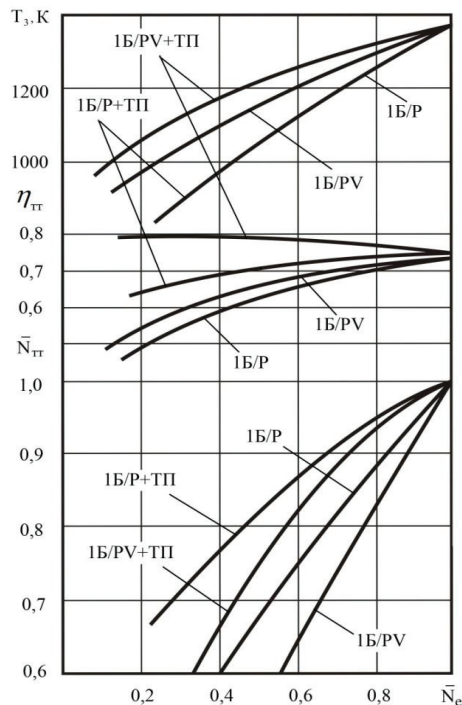


Рис. 5. Теплотехнические характеристики ГТД на частичных нагрузках при  $T_3=1373$  К,  $\pi_k = 5-6$ ,  $\pi_{dk} = 2,0$  и  $\sigma=0,85$

### 5. Выводы

1. Энергетические ГТД с ТП и регенерацией теплоты на всех режимах имеют эффективный КПД более высокий, чем в ГТД с регенерацией теплоты.
2. ГТД с ТП и регенерацией теплоты в одновальном исполнении турбокомпрессора с силовой турбиной на частичных винтовых нагрузках более экономичны, чем на частичных генераторных, и могут быть рекомендованы в качестве приводных для использования в газоперекачивающих агрегатах.
3. ГТД с ТКУ и регенерацией теплоты обладают высокими теплотехническими характеристиками и целесообразны для комбинированного производства энергии.

### Литература

1. Тарелин, А.А. Оценка эффективных путей развития отечественных приводных двигателей для газотранспортной системы [Текст]/ А.А. Тарелин, В.А. Коваль, Е.А. Ковалева// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/4 (40). – С. 4 – 8.
2. Романов, В. Газотурбинный двигатель для газовой промышленности [Текст]/ В. Романов, О. Кучеренко// Нефть и газ. – Киев, 2008. – № 6. – С. 22-26.
3. Матвеевко, В.Т. Энергетическая и экологическая эффективность когенерационных энергоустановок для коммунальных объектов энергопотребления [Текст]/ В.Т. Матвеевко// Коммунальное хозяйство городов: научн.-техн. сб. –К.: Техника, 2003. Вып. 49. – С. 119-123.
4. Матвеевко, В.Т. Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы [Текст]/ В.Т. Матвеевко// Авіаційно-космічна техніка і технологія; Зб. наук.праць –Харків: НАУ «ХАІ», 2001. Вып. 23. – С. 95-98.



5. Matviienko, V. Cogenerative GTE with turbocompressor utilize [Текст]/ V. Matviienko//Korea Institute of Machinery Materials. – Daejeon, 2006. –P.92-93.
6. Матвієнко, В.Т. Теплові схеми енергетичних газотурбінних комплексів для забезпечення енергією технологічного обладнання морських бурових платформ [Текст]/ В.Т. Матвієнко// Нафтова і газова промисловість. –2000. № 3. –С. 21-23.
7. Ревзин, Б.С. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты [Текст]/ Б.С. Ревзин//М.: Недра, 1986. – 215 с.
8. Котляр, И.В. Частичные и переходные режимы работы судовых газотурбинных установок [Текст]/ И.В. Котляр//Л.: Судостроение, 1966. –290 с.
9. Matviienko, V. Variable regimes operation of cogenerative gas-turbine engines with overexpansion turbine [Текст]/ V.Matviienko, V.Ocheretuanij //Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT 2010-22029. – 8 pp.

**Представлено методику узгодженої оптимізації параметрів циклів ГТУ і ПГУ і параметрів охолоджуваної проточної частини газової турбіни. В рамках цієї методики проведені оптимізаційні розрахунки схем ГТУ і ПГУ. Представлено результати розрахунків з висновками про перевагу оптимізації за даною методикою**

**Ключові слова: оптимізація ПГУ, оптимізація проточної частини, система охолодження проточної частини, ціна електроенергії**

**Представлена методика согласованной оптимизации параметров циклов ГТУ и ПГУ и параметров охлаждаемой проточной части газовой турбины. В рамках этой методики проведены оптимизационные расчеты схем ГТУ и ПГУ. Представлены результаты расчетов с выводами о преимуществе оптимизации по данной методике**

**Ключевые слова: оптимизация ПГУ, оптимизация проточной части, система охлаждения проточной части, цена электроэнергии**

УДК 621.311.23+621.438

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПГУ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

**А. М. Клер**

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем\*

e-mail: kler@isem.sei.irk.ru

**Ю. Б. Захаров**

Старший инженер\*

e-mail: contain@mail.ru

**Ю. М. Потанина**

Старший научный сотрудник\*

e-mail: julia@isem.sei.irk.ru

\*Институт систем энергетики

им. Л.А. Мелentyева СО РАН

ул. Лермонтова, 130, Иркутск-33, 664074

## 1. Введение

Современные мощные газотурбинные установки (ГТУ) создаются, в первую очередь, для работы в составе ПГУ, поэтому выбор параметров их термодинамического цикла должен производиться совместно с параметрами паротурбинной части ПГУ. Кроме того, они должны быть согласованы с параметрами охлаждаемой проточной части газовой турбины (ГТ).

Предлагаемые до последнего времени подходы к выбору указанных параметров предусматривали раздельную оптимизацию охлаждаемой проточной части ГТ [1-4], параметров цикла ГТУ и ПГУ [5-13], параметров цикла и системы охлаждения газовой турбины [14, 15]. В работе [16] предложена методика согласованной оптимизации параметров охлаждаемой проточной части ГТ и параметров цикла газотурбинной установки.

Следует отметить, что предлагаемая в работе [16] методика не предполагает отказ от использования существующих детальных комплексов моделирования

и оптимизации проточных частей газовых турбин [17, 18]. Используемые в ней описания процессов являются менее подробными, чем в указанных комплексах, но они гораздо более детальные, чем представления проточных частей ГТ в моделях оптимизации параметров цикла. Это позволяет получать более обоснованные решения по параметрам циклов, а затем уточнить параметры проточной части ГТ с использованием специализированных комплексов.

Суть методики [16] состоит в следующем. Формируются базовые наборы профилей сопловых и рабочих решёток. При этом входящие в эти наборы профили подбираются таким образом, чтобы диапазоны изменения характеристик профилей в наборе (конструктивные углы входа и выхода и коэффициент конфузности) как можно полнее охватывали множество возможных значений этих характеристик. Базовые профили могут выбираться из какого-либо каталога, или определяться в результате решения специальных задач нелинейного математического программирования (НЛП) по подбору коэффициентов кривых, опи-