

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вялов С.С., Александров Ю.А., Миренбург Ю.С. и др. Искусственное охлаждение грунтов с помощью термосвай // Инженерное мерзловедение. М-лы III МЛМ. М.: Наука, 1979, С. 72-90.
2. Рекомендации по проектированию и устройству парожидкостных охлаждающих установок при строительстве в суровых климатических условиях. М.: НИИОСП, 1977. 50 с.
3. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск: Наука, 1985. 169 с.
4. Пиоро И.Л., Антоненко В.А., Пиоро Л.С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами. Киев: Наукова думка, 1991.
5. Долгих Д.Г., Аникин Г.В., Феклистов В.Н. К расчету оптимальных параметров оребрения парожидкостных термостабилизаторов // М-лы конф. «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзловедения». Тюмень, 2008, С. 81-82.
6. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979.

*Михаил Сергеевич БЕЛОВ —
инженер-технолог ОАО «Газтурбосервис»,
аспирант кафедры механики и многофазных систем*

*Александр Борисович ШАБАРОВ —
зав. кафедрой механики и многофазных систем,
доктор технических наук, профессор
Тюменский государственный университет*

УДК 621.4

ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

АННОТАЦИЯ. Предложена методика расчета мощности газотурбинного двигателя. Данная методика, основанная на первом законе термодинамики, обеспечивает согласие расчетных параметров и экспериментальных данных.

The new procedure of gas-turbine engine power calculation is offered. This procedure based on the first law of thermodynamics allows to get the good consent of the experimental and calculated parameters.

Обеспечение современного уровня эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) на компрессорных станциях связано с технической диагностикой [1,2]. Разработка методики диагностики технического состояния ГТД является сложной задачей из-за недостаточного количества термогазодинамических параметров (ТПП) ГТД, измеряемых в условиях эксплуатации. Существующие и разрабатываемые методики контроля технического состояния ГТД необходимо проверять на испытательных станциях с использованием ТПП, полученных при приемосдаточных испытаниях.

На предприятии ОАО «Газтурбосервис», занимающемся капитальным ремонтом и обслуживанием газоперекачивающих агрегатов, создан уникальный стенд по испытанию ГТД. В качестве нагрузки ГТД на данном стенде используется турбогенератор, вырабатываемая электроэнергия передается в общую городскую электросеть г. Тюмени. Современное оборудование, средства измерения и система управления позволяют реализовать различные методы контроля и диагностики технического состояния работающего ГТД: виброакустический, термогазодинамический, пирометрический, тензометрирование, анализ масла и продуктов сгорания [3, 4].

В качестве основных результирующих параметров выбраны эффективная мощность N_e и коэффициент полезного действия (КПД) ГТД. Объектом исследования являлся ГТД судового типа ДР59 Л, номинальная мощность 10 МВт, применяемый при транспорте природного газа по магистральным трубопроводам [5]. Сбор данных производился при снижении загрузки на следующих режимах работы ГТД по мощности — N , $0,9N$, $0,8N$, $0,75N$, $0,5N$, $0,25N$ (где N — номинальная мощность ГТД). Для достижения стационарности параметров перед началом сбора данных двигатель работает на требуемом режиме не менее 5 минут [6]. Схема расчетных сечений представлена на рис. 1. Термогазодинамические параметры, полученные в процессе испытания ГТД, представлены в табл. 1.

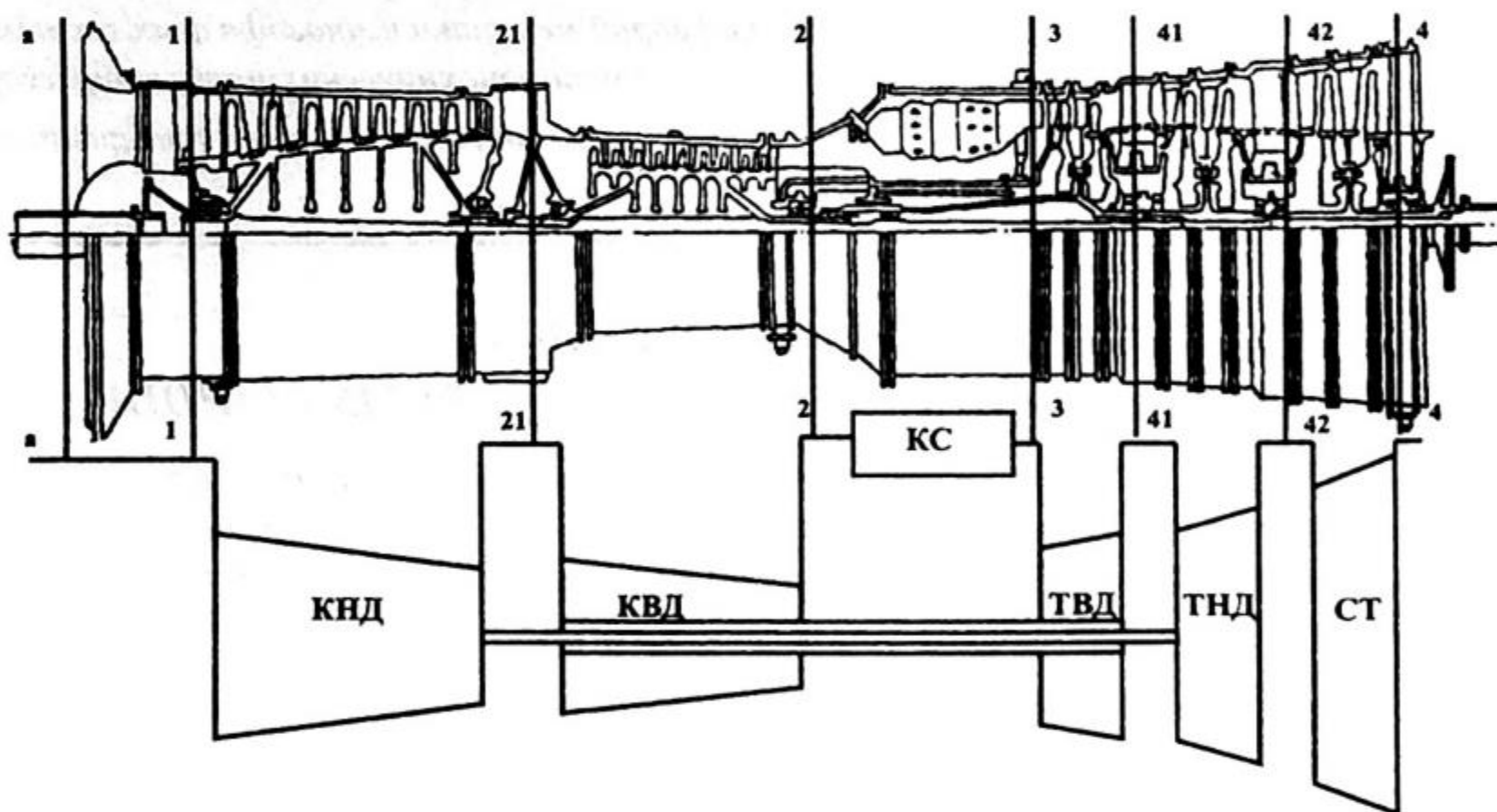


Рис. 1. Схема расчетных сечений ГТД ДР59Л
(обозначения: узлы — КНД — компрессор низкого давления;
КВД — компрессор высокого давления;
КС — камера сгорания; ТВД — турбина высокого давления;
ТНД — турбина низкого давления; СТ — силовая турбина;
сечения двигателя — а-а — перед входом в ГТД;
1-1 — перед входом в КНД; 21-21 — на выходе из КНД;
2-2 — на выходе из КВД; 3-3 — перед ТВД;
41-41 — на выходе ТВД; 42-42 — на выходе ТНД;
4-4 — на выходе СТ)

Таблица 1

Измеряемые параметры

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность при измерениях	Размерность в СИ
1	Число оборотов КВД	$n_{\text{КВД}}$	об/мин	Гц
2	Число оборотов КНД	$n_{\text{КНД}}$	об/мин	Гц
3	Число оборотов СТ	$n_{\text{СТ}}$	об/мин	Гц
4	Массовый расход топливного газа	M_t	кг/ч	кг/с
5	Кэффициент полезного действия ГТД	$\eta_{\text{ГТД}}$	%	-
6	Мощность ГТД	$N_{\text{ГТД}}$	кВт	кВт
7	Мощность генератора	$N_{\text{ГЕН}}$	кВт	кВт
8	Температура топливного газа	$T_{\text{ТГ}}$	$^{\circ}\text{C}$	К
9	Теплотворная способность топливного газа	Q_{H}^{P}	ккал/м ³	кДж/кг
10	Абсолютная плотность топливного газа	$\rho_{\text{абс.}}$	Кг/м ³	кг/м ³
11	Относительная плотность топливного газа	$\rho_{\text{отн.}}$	Кг/м ³	кг/м ³
Сечение а-а				
12	Атмосферное давление	P_a	мм.рт.ст.	Па
13	Температура воздуха	T_a	$^{\circ}\text{C}$	К
Сечение 1-1				
14	Статическое давление воздуха	P_1	мм.вод.ст.	Па
15	Полное давление воздуха	$P_{1\text{полн}}$	мм.вод.ст.	Па
Сечение 21-21				
16	Давление воздуха за КНД	P_{21}^*	Мпа	Па
Сечение 2-2				
17	Давление воздуха за КВД	P_2^*	Мпа	Па
18	Температура воздуха за КВД	T_2^*	$^{\circ}\text{C}$	К
Сечение 41-41				
19	Температура продуктов сгорания за ТВД	T_{41}^*	$^{\circ}\text{C}$	К
Сечение 4-4				
20	Температура продуктов сгорания за СТ	T_4^*	$^{\circ}\text{C}$	К

Для сбора данных с применением штатной аппаратуры испытательного стенда использовались протоколы испытаний и электронная база данных в системе автоматизированного управления (САУ), если необходимая информация отсутствовала в протоколах.

При разработке системы диагностики мощности и эффективности двигателя в стендовых условиях [7] были внедрены, дополнительно к штатному оборудованию, система замера расхода воздуха G_v во входном устройстве двигателя и

замер температуры T_4^* продуктов сгорания за силовой турбиной. Для измерения полного и статического давления вместо 4 промывочных форсунок, расположенных на переднем корпусе ГТД (рис. 2) устанавливаются трубки Пито-Прандтля. Приемное отверстие трубок опущено на $1/3$ высоты входного канала от внешней стенки.

Принципиальная схема трубок Пито-Прандтля приведена на рис. 3.

Замер температуры выхлопных газов производится на выходе из выхлопной улитки. Для определения температур продуктов сгорания за ТВД и СТ используются термопары ТХА-9426.

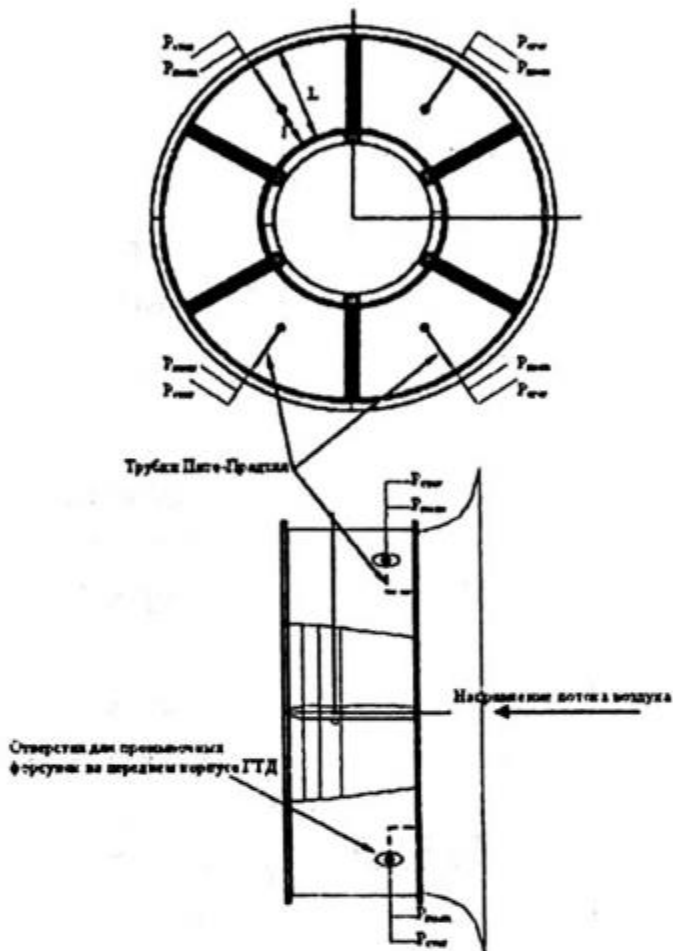


Рис. 2. Схемы расположения трубок Пито-Прандтля

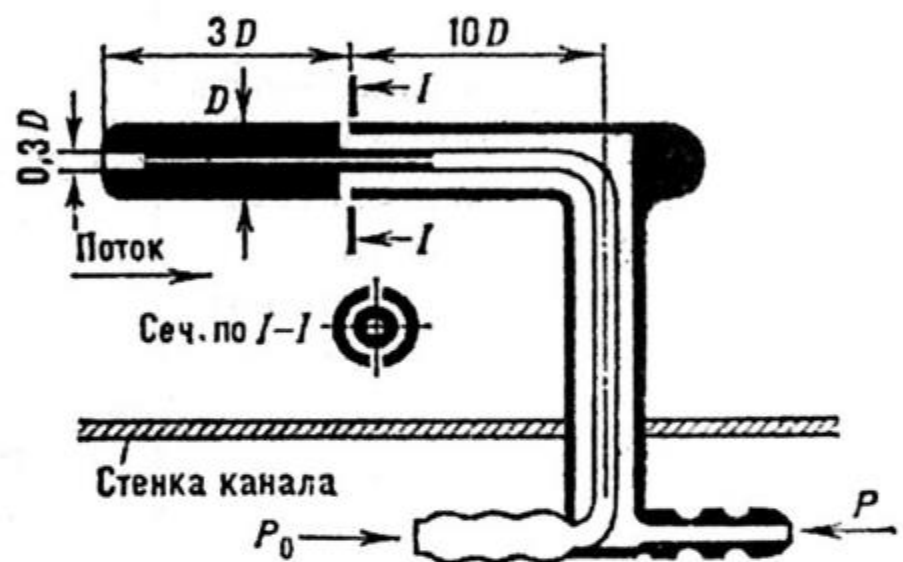


Рис. 3. Принципиальная схема трубок Пито-Прандтля (обозначения: P_0 — полное давление, P — статическое давление)

Расчет мощности и КПД ГТД производился по двум методикам, основанным на балансовых уравнениях термогазодинамики [8, 9, 10, 11].

Расчет мощности ГТД (по методике 1) основан на использовании первого начала термодинамики применительно к ГТД как единому узлу. Эффективная мощность ГТД на каждом режиме рассчитывается из закона сохранения энергии в форме:

$$N_e = (Q_H^P \cdot G_{ТГ} \cdot \eta_{КС} + C_{P,ТГ} \cdot G_{ТГ} \cdot T_{ТГ}^* + C_{P,В} \cdot G_V \cdot T_1^* - C_{P,ПС} \cdot (G_V + G_{ТГ}) \cdot T_4^* - Q_{вн}) \cdot \eta_{мех}$$

Данная методика позволяет оценить мощность и КПД ГТД, используя минимальное количество измеряемых и предварительно вычисляемых ТГП.

Методика 2 расчета мощности основана на применении первого начала термодинамики к основным узлам ГТУ [12]. Основные этапы расчета мощности сводятся к определению следующих величин:

1. Мощность компрессоров

$$N_{OK} = G_V \cdot C_{P\theta} \cdot (T_2^* - T_1^*),$$

где $C_{P\theta}$ — теплоемкость воздуха;

2. Температура продуктов сгорания за КС

$$T_3^* = T_2^* + \frac{Q_n^p \cdot G_T \cdot \eta_{КС}}{G_B \cdot C_{P_6}}$$

где Q_n^p — теплотворная способность топливного газа, $\eta_{КС}$ — термический КПД камеры сгорания;

3. Мощность ТВД

$$N_{ТВД} = G_{ПС} \cdot C_{P_{ПС}} \cdot (T_{41}^* - T_3^*),$$

где $G_{ПС}$ — расход продуктов сгорания, складывающийся из расходов воздуха и топливного газа, $C_{P_{ПС}}$ — теплоемкость продуктов сгорания;

4. Мощность ТНД

$$N_{ТНД} = \frac{N_{ОК}}{\eta_{мех}} - N_{ТВД},$$

где $\eta_{мех}$ — коэффициент механических потерь мощности в опорах валов ГТД;

5. Температура продуктов сгорания за ТНД

$$T_{42}^* = T_{41}^* - \frac{N_{ТНД}}{G_{ПС} \cdot C_{P_{ПС}}};$$

6. Мощность СТ и эффективной мощности ГТД

$$N_{СТ} = G_{ПС} \cdot C_{P_{ПС}} \cdot (T_4^* - T_{41}^*); N_e = N_{СТ} \eta_{мехСТ};$$

7. Коэффициент полезного действия ГТД

$$\eta_e = \frac{N_{СТ}}{Q_n^p \cdot G_T}.$$

Установлено, что результаты расчета мощности ГТД по первой и второй методике отличаются не более чем на 0,5 % по сравнению с мощностью ГТД, полученной при пересчете экспериментально определенной мощности генератора. Результаты расчета параметров по данным термогазодинамических изменений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры двигателя, определенные при термогазодинамической диагностике

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Режим работы ГТД (1,0 N – режим номинальной мощности)				
			0,5N	0,75N	0,8N	0,9N	1,0N
1	2	3	4	5	6	7	8
Расход воздуха	$G_{Впр}$	кг/с	69,715	78,091	79,315	82,089	84,928
Расход топливного газа	$G_{ТГпр}$	кг/с	0,4803	0,5894	0,6103	0,6511	0,6947
Мощность ГТД по варианту 1	N_e	кВт	5006	7049	7546	8412	9434
КПД ГТД по варианту 1	η_{el}	д.ед.	0,2106	0,2412	0,2493	0,2604	0,2736

1	2	3	4	5	6	7	8
Мощность осевого компрессора	N_K	кВт	16557	20126	20985	22033	23295
Температура продуктов сгорания за КС	T_3^*	К	818,4	866,1	879,3	893,3	912,1
Мощность ГТД по варианту 2	$N_{ГТД2}$	кВт	5069	7096	7574	8438	9445
КПД ГТД по варианту 2	η_{el}	д.ед.	0,2132	0,2428	0,2502	0,2612	0,2739
Мощность ГТД по мощности и КПД генератора и редуктора		кВт	4782	7113	7548	8514	9447

Дополнительно к расчетам мощности и КПД на каждом из режимов был произведен расчет термогазодинамических параметров в процессе одного испытания. На рис. 4 приведено сравнение мощности ГТД, рассчитанной по методике 1, и мощности полученной САУ при пересчете мощности генератора.

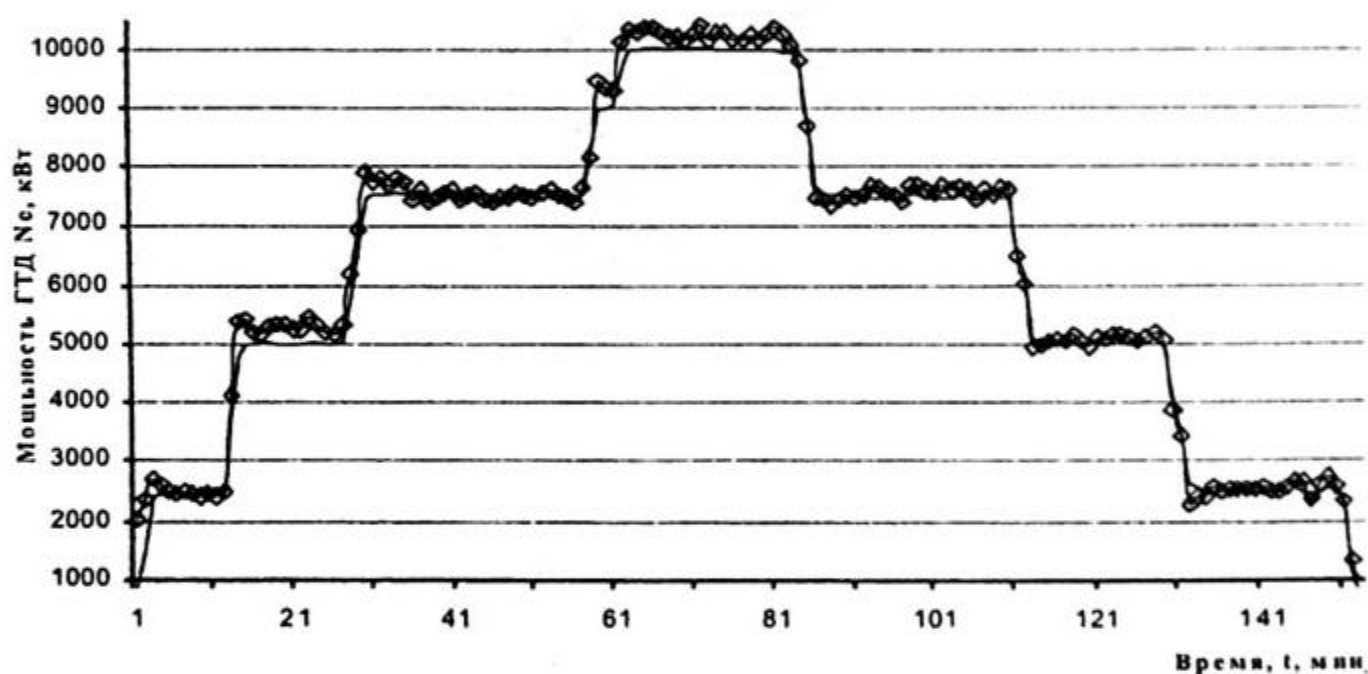


Рис. 4. Изменение мощности ГТД на различных режимах (—◇— расчет по разработанной модели, — экспериментальные значения, полученные с помощью автоматизированной системы)

Выводы.

1. Разработан метод определения мощности ГТД в условиях испытательного стенда на различных режимах, основанный на применении принципа минимально достаточного количества измерений (расход и температура воздуха, расход и температура топлива, температура продуктов сгорания за СТ). Метод может быть использован после соответствующей адаптации при определении мощности и КПД двигателя в условиях эксплуатации на компрессорной станции.

2. Предложен способ определения расхода рабочего тела через газотурбинный двигатель, основанный на уравнении баланса мощности на валу высокого давления и предусматривающий измерение расхода топливного газа и температуры за КНД и КВД, а также за ТВД.

3. Проведен анализ экспериментальных данных, полученных при испытаниях двигателей на стенде. Получены значения опытных коэффициентов расходов, необходимых для идентификации расчетных алгоритмов.

4. Показано удовлетворительное соответствие разработанных расчетных моделей и алгоритмов экспериментальным данным по мощности и КПД для двигателей в диапазоне от 50% до 100% от номинальной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 280 с.
2. Зарицкий С.П., Лопатин А.С. Диагностика газоперекачивающих агрегатов. Ч. 1-5. М.: Изд. РГУ им И. М. Губкина, 2003.
3. Сиротин Н.Н., Коровин Ю.М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 272 с.
4. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Елисеев Ю.С., Крылов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. М.: Высшая школа, 2002. 335 с.
5. Бондин Ю.Н. Зоря-Машпроект / Николаев: Изд. Юг-Информ, 2004. 120 с.
6. Вакулин А.А., Шабаров А.Б. Диагностика тепловых параметров в нефтегазовых технологиях. Новосибирск.: Наука, 1998. 384 с.
7. Микаэлян Э.А. Эксплуатация газотурбинных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций газопроводов. М.: Недра, 1994. 304 с.
8. Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е. и др. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000. 640 с.
9. Бекнев В.С., Шабаров А.Б., Михальцев В.Е. Турбомашины газотурбинных и комбинированных установок / М.: Машиностроение, 1983. 392 с.
10. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 609 с.
11. Бекнев В.С., Леонтьев А.И., Шабаров А.Б. и др. Газовая динамика: Учебник для вузов / М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 1997. 671 с.
12. Топунов А.М. Теория судовых турбин. Л.: Судостроение, 1985. 472 с.

*Станислав Владимирович БУЧИНСКИЙ —
ведущий инженер
ООО «Нефтегазовый научный центр»,
аспирант Тюменского государственного университета*

*Александр Борисович ШАБАРОВ —
зав. кафедрой механики и многофазных систем
Тюменского государственного университета,
доктор технических наук, профессор*

*Андрей Николаевич БУРБАСОВ —
генеральный директор ОАО «Сибнефтегаз»*

УДК 624.139

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА МЕТАНОЛА ПРИ СБОРЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

АННОТАЦИЯ. В результате проведенных исследований режимов работы реального газопровода Берегового газоконденсатного месторождения (Ямал)