

УДК 622.279.8

А.Н. Кубанов, М.А. Воронцов, Д.М. Федулов, В.Ю. Глазунов

Технологический анализ работы турбохолодильной техники на начальном этапе эксплуатации УКПГ-2 Бованенковского НГКМ

Ключевые слова: низкотемпературная сепарация, турбодетандерный агрегат, производительность технологических линий, коэффициент полезного действия.

Keywords: low-temperature separation, turbo-expander, performance of production lines, efficiency.

Согласно Проекту обустройства Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) подготовка газа на установке комплексной подготовки газа (УКПГ) осуществляется по технологии низкотемпературной сепарации (НТС) с турбодетандерными агрегатами (ТДА). Упрощенная принципиальная схема НТС с ТДА приведена на рис. 1. Схемой предусмотрена трехступенчатая сепарация, охлаждение газа происходит при редуцировании на узле входных ниток в рекуперативном теплообменнике 20Т-1 и турбодетандере ТДА [1]. Газ НТС после компримирования в турбокомпрессоре ТДА и на дожимной компрессорной станции 1 (ДКС) охлаждается в воздушном холодильнике 20ВХ-1 и рекуперативном теплообменнике 20Т-2.

Эффективность технологии НТС с ТДА зависит от надежности и эффективности работы турбохолодильного, теплообменного и сепарационного оборудования, поэтому на начальной стадии освоения новых технологий, оборудования и машин велика роль научной организации, которая осуществляет технологическое сопровождение эксплуатации, помогая эксплуатирующему персоналу и генпроектировщику осмысливать неизбежно возникающие проблемы, своевременно находить их решения и исключать повторение в будущем. Решение данных задач было возложено на ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

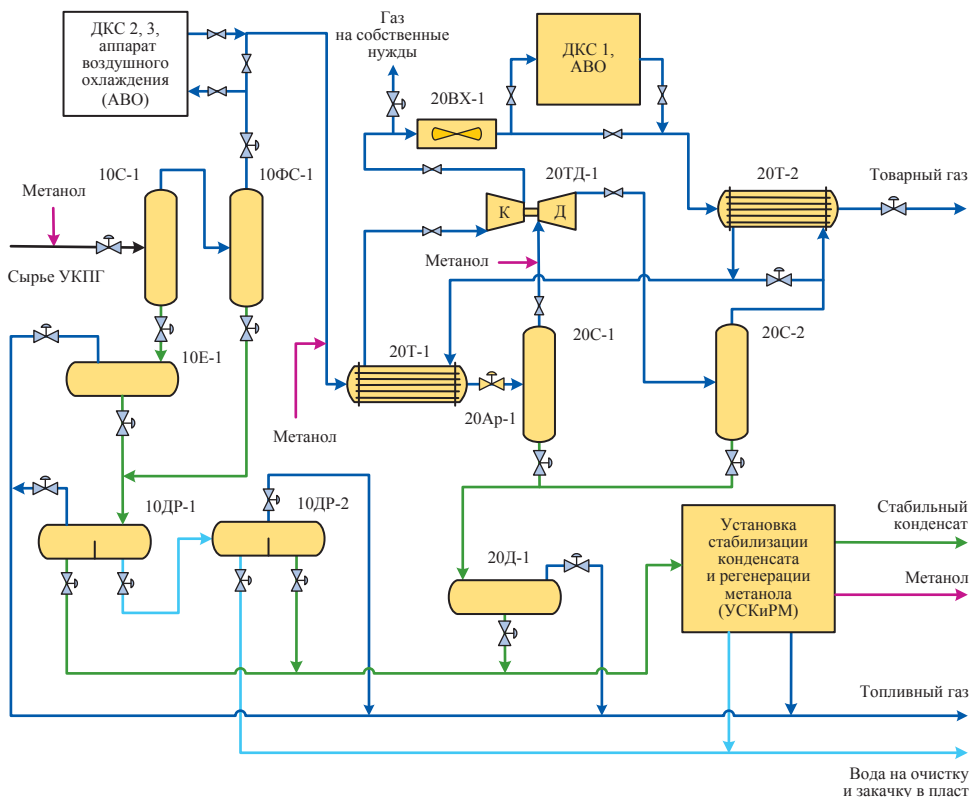


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема установки НТС с ТДА

Технологический анализ работы турбохолодильной техники проведен на основе статистических данных по режимам работы установки НТС с ТДА и комплексного обследования первого модуля УКПГ-2, сделанного специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» с участием сотрудников Инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Надым» в декабре 2012 г. Анализу подлежали технологические причины нештатных остановов ТДА, несоответствие режимов ТДА требованиям Технических условий (ТУ) на разработку ТДА, термодинамическая эффективность ТДА, способы оценки расхода газа по технологическим линиям по характеристикам ТДА. Кроме того, был разработан методический подход к решению задачи оптимизации работы турбодетандерного агрегата как элемента технологической системы НТС.

Технологические причины остановов ТДА

Нештатные остановки ТДА происходили как вследствие технологических причин, так и неполадок оборудования. В ряде случаев причиной являлась неустойчивая работа ДКС (переключения для работы «на кольцо»).

Анализ информации из журнала оператора промысла показал, что в большинстве случаев нештатные остановки происходили из-за превышения допустимых значений виброперемещений ротора.

Анализ трендов параметров работы технологических линий НТС показал, что остановам ТДА по вибрации предшествовало увеличение гидравлического сопротивления в трубном пространстве 20Т-1 до 2000 кПа, вследствие чего снижалось давление на входе в турбодетандер, и программа САУ для компенсации этого явления увеличивала расход газа открытием крана на арматурном узле 20Ар-1. Резкое открытие крана 20Ар-1 предположительно приводило к возникновению колебаний потока на участке «20Ар-1 – 20С-1 – вход в турбодетандер» и увеличению виброперемещений ротора ТДА. Кроме этого, к нештатным остановам ТДА приводили неполадки в кранах фирмы «Моквелд».

Технологической причиной роста гидросопротивления в 20Т-1 может быть только гидратообразование. Наличие процесса гидратообразования также подтверждено тем, что после увеличения подачи метанола перед 20Т-1 и на выходе из 20С-1 ситуация нормализовалась, а аварийные остановки ТДА далее не наблюдались. Доказательством наличия гидратных режимов является также обнаруженная закономерность: остановки ТДА приходились на режимы с пониженной подачей метанола в газ перед теплообменником 20Т-1. На рис. 2 выделены точки на поле параметров, причем каждой точке соответствовало несколько отказов ТДА, расположенных на разных технологических линиях установки НТС.

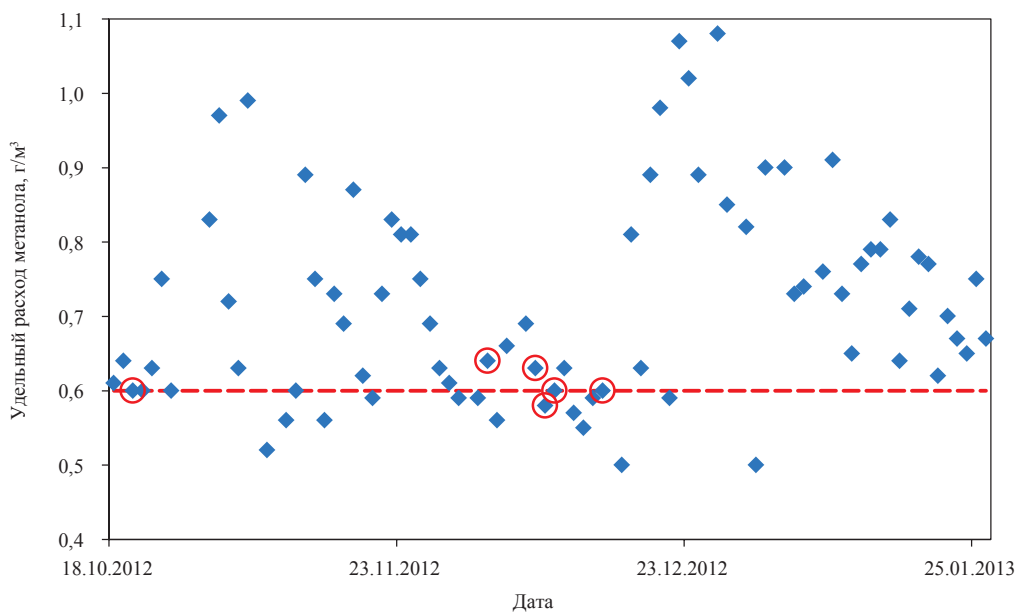


Рис. 2. Удельная подача метанола на УКПГ. Выделенные точки соответствуют нештатным остановам ТДА, пунктирная линия – проектному значению подачи метанола

Таким образом, для исключения нештатных остановов ТДА необходимо повысить нормы потребления (потерь) метанола, которые оказались слишком низкими. Отметим также, что эксплуатация установок НТС на месторождениях с низким содержанием углеводородов (УВ) C_{5+B} (к ним относятся аптские залежи) характеризуется минимальным потреблением метанола по сравнению с полноценными газоконденсатными месторождениями (например, 0,30 против 1,2–1,6 г/м³). Поэтому снижение потребления метанола должно осуществляться постепенно и на основе специальных хорошо обоснованных мероприятий. В противном случае не получится экономии, поскольку для ликвидации уже сформировавшихся гидратов потребуется резкое увеличение подачи метанола, что также приведет к его значительным неоправданным потерям с газом сепарации.

Соответствие режимов ТДА требованиям ТУ

Технические условия на разработку ТДА были созданы на основании исходных данных ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (2006 г.) для проектирования схемы НТС с байпасом по рекуперативному теплообменнику 20Т-1 и содержали диапазон изменения показателей эксплуатации и один номинальный режим. В качестве номинального режима для ТУ был выбран частный случай эксплуатации ТДА в зимних условиях при низких степенях расширения, в то время как практически все режимы в течение всего срока эксплуатации, включая начальные, характеризуются более высокой степенью расширения – 2 ед. и более. В проектной схеме байпас 20Т-1 по межтрубному потоку отсутствовал, что не позволило регулировать степень рекуперации холода и, соответственно, температуру газа на входе в турбодетандер и турбокомпрессор, поэтому температурные режимы работы ТДА могли также отличаться от значений из ТУ.

Диапазон показателей эксплуатации в целом соответствовал регламентированному в ТУ, но заданный номинальный режим, который должен быть эталоном при оценке эффективности и технического состояния оборудования, оказался в принципе не реализуем. Это вызвало массу недоумений, привело к противоречиям между представителями эксплуатации и изготовителями оборудования и, как следствие, к длительной дискуссии.

Вследствие этого рекомендуется разработать новые режимные характеристики эксплуа-

тации ТДА в составе реализованной технологической схемы с учетом фактических характеристик установленного оборудования, включая сепарационное и теплообменное, после чего внести коррективы в ТУ. В новой редакции ТУ должны быть указаны несколько характерных режимов, учитывающих сезонность и периоды технологического развития промысловой технологической системы (работа с ДКС 1, ввод ДКС 2, 3).

Термодинамическая эффективность ТДА

Анализ фактических данных показал, что параметры работы установленных ТДА в основном соответствуют диапазонам, регламентированным ТУ:

- перепад температур на турбодетандерах – 38–27 градусов;
- температура за турбиной – (–32)–(–25) °С при степенях расширения 1,8–1,5;
- давление на выходе компрессора – 6,48–6,56 МПа при степенях сжатия 1,20–1,37;
- частота вращения ротора изменялась в диапазоне 10000–15000 об/мин, что не превышает максимально допустимого значения (17000 об/мин).

При этом обеспечиваются высокая степень охлаждения, $(\Delta T/\Delta P)_T = 0,83–0,85$ град/ата, и коэффициент восстановления давления в ТДА, $\Delta P_K/\Delta P_T = 0,4$.

При оценке термодинамической эффективности ТДА, помимо рассмотренных выше затруднений формального характера, также возникли объективные технические проблемы достижения устойчивых режимов работы технологических линий, погрешности измерений параметров, особенно производительности.

Это создало сложности при интерпретации полученных данных. В результате прямого расчета адиабатных КПД детандеров и компрессоров ТДА по показаниям приборов в большинстве случаев были получены нефизичные результаты: дисбаланс по мощности компрессора и турбины (9–12 %) и недостижимо высокие значения КПД компрессора (более 90 %).

На данной стадии анализа авторы провели моделирование фактических режимов технологической схемы НТС с использованием программных комплексов «Комфорт-Модельгаз» (уравнение состояния Патела–Тея) и HYSYS (уравнение состояния Пенга–Робинсона).

Была выявлена высокая чувствительность расчетных значений КПД турбины и компрессора ТДА к погрешностям измерения давления

и температуры газа после турбины (таблица). Повышение давления за турбиной на 0,05 МПа (режим 2) или понижение температуры на полградуса (режим 3) приводит к увеличению КПД турбины на 2–3 % (абс.) и одновременному снижению КПД компрессора на 2–3 % (абс.). В реальной эксплуатации два описанных фактора действуют одновременно (режим 4), т.е. погрешности суммируются, но в какой степени – пока неясно.

Вследствие высокой чувствительности результатов оценки КПД турбины и компрессора ТДА к точности измерения температуры и давления после турбины их определение по штатным приборам носит условный характер.

Для оперативной оценки эффективности работы ТДА по текущим показаниям штатных приборов необходимо использовать более стабильные показатели эффективности, в меньшей степени чувствительные к малым отклонениям показателей эксплуатации, чем адиабатный КПД: степень охлаждения в турбодетандере $(\Delta T/\Delta P)_T$ и коэффициент восстановления давления в компрессоре ТДА $\Delta P_K/\Delta P_T$. Согласно таблице, при значительном изменении расчетных значений адиабатных КПД (на 2,0–6,6 %) показатели $(\Delta T/\Delta P)_T$ и $\Delta P_K/\Delta P_T$ изменятся не более чем на 1,1–2,4 %.

К нетехнологическим причинам снижения эффективности ТДА относится высокая чувствительность КПД осевой турбины детандера к увеличению радиального зазора между рабочими лопатками и статором за счет износа алюминиевых уплотнительных колец и прикрытия поворотного соплового аппарата.

Оценка производительности технологических линий по характеристикам ТДА

Погрешность измерения расхода газа по технологическим линиям НТС приводит к тому, что сумма показаний расходомеров на 10–15 % ниже показаний хозрасчетного узла замера. Наиболее вероятно, что причина погрешностей обусловлена расположением индивидуальных расходомеров на участках после теплообменников 20Т-1, т.е. на двухфазных потоках, в которых присутствует как водная, так и углеводородная фазы. Кроме того, необходимо иметь в виду, что на 20Ар-1 происходит не только регулирование расхода, но и срабатывает избыточный перепад давления, т.е. содержание жидкости возрастает дополнительно.

В последующих проектах необходимо располагать расходомеры на участках с однофазным режимом течения газа, например в отопляемом цехе ТДА – перед компрессором ТДА.

Неопределенность измерения расхода приводит к дополнительным затруднениям при оценке фактических характеристик и эффективности оборудования. Для уточнения показаний расходомеров предлагается определить поправочные коэффициенты для показаний расходомеров в результате обработки большого объема фактических данных.

Оценку значений расходов можно провести как по совмещенным характеристикам ТДА, так и по газодинамическим характеристикам (ГДХ) компрессора ТДА. Для оценки по совмещенной характеристике требуются показания датчиков частоты вращения,

Чувствительность показателей эффективности работы ТДА к погрешности измерения термобарических параметров после турбодетандера

Показатели работы ТДА	Базовый режим	$\Delta P = 0,5$ ата	$\Delta T_{\text{вых}} = -0,5$ °С	$\Delta P = 0,5$ ата, $\Delta T_{\text{вых}} = -0,5$ °С
	1	2	3	4
Турбина ТДА				
Давление «вход / выход», МПа	9,55 / 5,08	9,55 / 5,13	9,55 / 5,08	9,55 / 5,13
Температура «вход / выход», °С	9,0 / -28,7	9,0 / -28,7	9,0 / -29,2	9,0 / -29,2
Компрессор ТДА				
Давление «вход / выход», МПа	4,77 / 6,56	4,77 / 6,56	4,77 / 6,56	4,77 / 6,56
Температура «вход / выход», °С	13,9 / 39,3	13,9 / 39,7	13,9 / 40,2	13,9 / 40,2
Показатели эффективности работы ТДА				
Адиабатный КПД турбины	0,742	0,768	0,765	0,791
Адиабатный КПД компрессора	0,913	0,895	0,886	0,869
Степень охлаждения в турбине $(\Delta T/\Delta P)_T$, град/ата (град/МПа)	0,827 (8,434)	0,836 (8,529)	0,838 (8,545)	0,847 (8,643)
Коэффициент восстановления давления в ТДА $(\Delta P_K/\Delta P_T)$	0,400	0,405	0,400	0,405

при оценке по ГДХ – также и значения давлений на входе и выходе компрессора. Данные приводятся к условиям, при которых получены соответствующие паспортные характеристики, после чего определяется значение расхода газа через ТДА.

Пример оценки производительности по совмещенной характеристике ТДА при номинальном угле установки соплового аппарата (СА) турбины представлен на рис. 3. При этом расхождение суммарной производительности по линиям с показаниями хозрасчетного узла замера составило 3–5 %. Погрешность оценки обусловлена различием углов установки СА и техническим состоянием ТДА, также возможно искажение фактических характеристик вследствие поступления двухфазного потока в турбину.

Поэтому более точным (хотя и несколько более трудоемким) методом является использование индивидуальных характеристик компрессора ТДА. В этом случае исключается вероятность возникновения нерасчетных эффектов, обусловленных двухфазным потоком, поскольку в компрессор ТДА подается уже подготовленный газ. При оценке расхода газа по газодинамической характеристике компрессора ТДА расхождение с показаниями хозрасчетного узла замера не превышает 1,2 %.

Анализ режимов работы ТДА позволяет существенно сократить область неопределенности информации о фактических режимах работы технологии НТС с ТДА в целом, поэтому крайне важно наличие адекватных газодинамических характеристик компрессора и турбины

ТДА для различных углов установки соплового аппарата. Характеристики ТДА должны позволять проводить оценку технического состояния турбины и компрессора и осуществлять построение математических моделей процессов детандирования и компримирования газа.

Комплексная оценка эффективности НТС с ТДА

Турбодетандер входит в интерактивную систему, элементы которой (турбохолодильное, теплообменное, сепарационное, компрессорное оборудование и аппараты воздушного охлаждения) оказывают взаимное влияние на работу друг друга и на обеспечение системных технологических функций. Поэтому для практики эксплуатации и дальнейшего совершенствования рассматриваемой технологии актуальна комплексная оценка эффективности каждой единицы оборудования с учетом влияния на эффективность технологии в целом.

Для комплексной оценки эффективности работы НТС с ТДА необходимо установить соответствие между режимами работы ТДА и показателями качества подготовки газа. Для этого осуществляется расчет режимов работы НТС с ТДА при фиксированных характеристиках теплообменного, сепарационного и компрессорного оборудования для различных параметров работы турбодетандера. В результате определяется область допустимой работы технологии, в которой одновременно обеспечиваются требования к температуре НТС и на выходе из УКПГ (рис. 4).

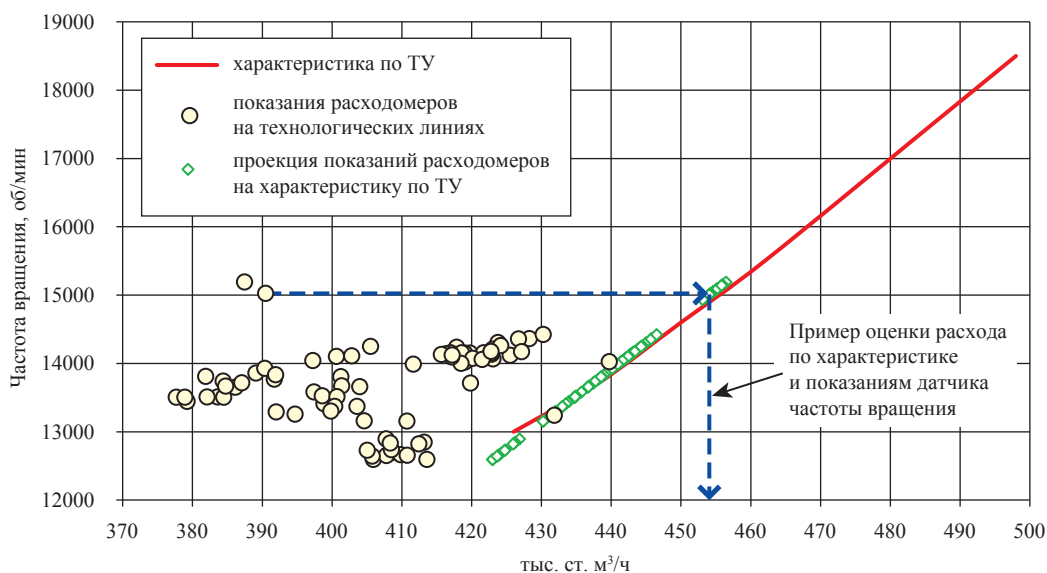


Рис. 3. Оценка производительности технологических линий по характеристике ТДА по ТУ

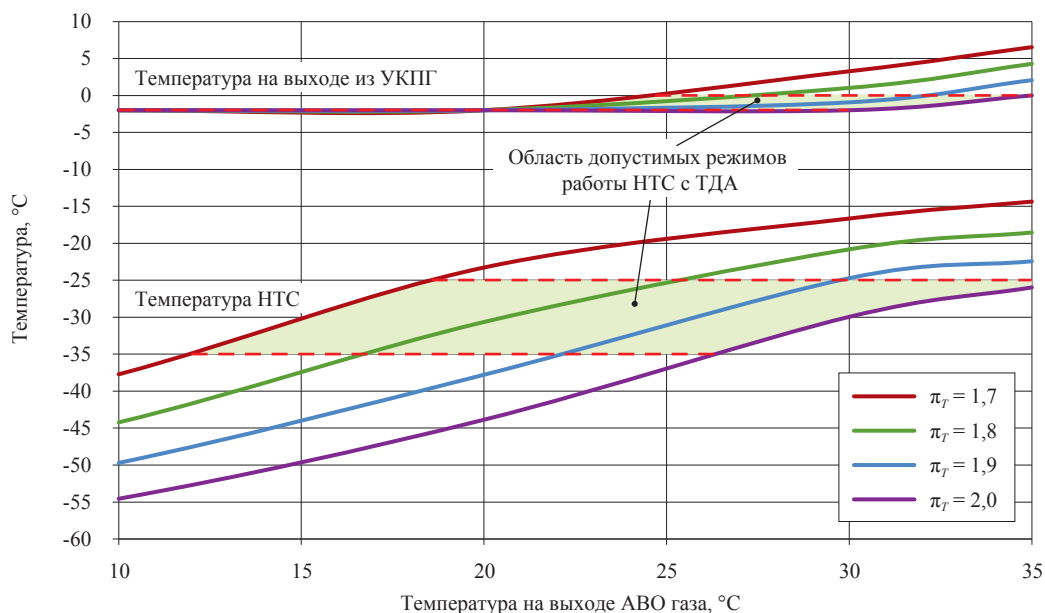


Рис. 4. Оценка области допустимых режимов работы ТДА

В связи с тем, что адекватные газодинамические характеристики ТДА пока отсутствуют, номограммы построены для серии значений степени расширения газа в детандере (от 1,7 до 2,0 ед.). Для каждого значения степени расширения определялись зависимости температуры НТС и температуры газа на выходе из УКПГ от температуры газа после воздушных холодильников 20ВХ-1 и АВО ДКС 1. На поле номограммы выделена область между температурами НТС $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (лето) и $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зима). Эта область определяет диапазоны основных параметров ТДА, воздушных холодильников и НТС и является основой для оптимизации всей технологической системы. Согласно рис. 4, в летний период обеспечить приемлемые температурные режимы НТС ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) и температуру газа на выходе из УКПГ ($(-2)\text{--}0\text{ }^{\circ}\text{C}$) возможно только при степени расширения в турбодетандере не менее 2 ед., при этом давление газа в

первичном сепараторе должно составить не менее 10,6 МПа. Напротив, в зимний период при стремлении максимально полно использовать холод атмосферного воздуха потребуются минимальное давление входного газа (9,6 МПа) со степенью расширения в турбодетандере 1,7 ед.

Дальнейшую более детальную оптимизацию технологической системы НТС с ТДА можно проводить только с участием разработчиков ТДА.

Полученные знания о процессе позволяют принимать обоснованные решения при оперативном регулировании системы (определений степени расширений, температуры АВО), делать выводы о пределах применимости существующих ТДА и разрабатывать требования для их модификации. Такой подход целесообразно использовать при разработке новых режимных характеристик эксплуатации ТДА для новой редакции ТУ.

Список литературы

1. Кубанов А.Н. Особенности использования процесса НТС для подготовки к транспорту тощих газов месторождений полуострова Ямал / А.Н. Кубанов // Материалы научно-технического совета РАО «Газпром» (Саратов, окт. 1995 г.). – М.: ИРЦ Газпром, 1996. – С. 94–100.