

Получение и учёт фактических характеристик оборудования при расчётах режимов компрессорных станций магистральных газопроводов

Аналізується вплив технічного стану основного обладнання компресорних станцій на режим роботи магістральних газопроводів. Розглядаються алгоритми ідентифікації реальних газодинамічних характеристик газотурбінних установок та відцентрових нагнітачів.

Анализируется влияние технического состояния основного оборудования компрессорных станций на режим работы магистральных газопроводов. Рассматриваются алгоритмы идентификации реальных характеристик газотурбинных установок и центробежных нагнетателей.

Перед газовой промышленностью Украины в новых политических и экономических условиях остро и актуально встала задача поддержки оптимальной производительности системы магистральных газопроводов, которая является одной из самых сложных в мире и от нормальной работы которой во многом зависит экономическая ситуация и безопасность страны.

Более 50% газопроводов Украины эксплуатируются от 14 до 49 лет, а 5,5 тыс. км газопроводов отработали свой амортизационный срок.* На магистральных газопроводах функционируют более 120 компрессорных цехов, на которых установлено около 450 газоперекачивающих агрегатов (ГПА), большинство из которых устарели и не соответствуют современным требованиям по надежности и экономичности. Около 60% парка газоперекачивающих агрегатов Украины отработали установленный моторесурс, и дальнейшая их эксплуатация не обеспечивает эффективной работы. Ежегодно планируются мероприятия по капитальному ремонту и реконструкции объектов, но в условиях кризиса неплатежей, в котором находятся украинские предприятия, выполняется лишь малая их часть.

Трубопроводный транспорт газа является достаточно ёмким потребителем газа и электроэнергии за счет затрат на собственные нужды, технологических и случайных причин. Существенную экономию топливно-энергетических ресурсов можно получить за счет совершенствования технологического процесса транспорта газа. В значительной степени экономия обеспечивается учетом реального технического состояния основного оборудования магистральных газопроводов. Оперативная диагностика компрессорного оборудования дает возможность определить техническое состояние каждого отдельного газоперекачивающего агрегата, что позволяет провести адекватный анализ работы и оценить пер-

спективные возможности газотранспортных систем (ГТС), проводя прогнозные расчеты стационарных режимов.

До настоящего времени отсутствовали научно-технические методы и средства для управления функционированием и развитием газотранспортных систем, которые учитывали бы фактическое техническое состояние оборудования этих систем. Разработанные ранее методы и средства более пригодны для проведения проектных работ по развитию, но ни в коем случае не могут быть использованы для управления эксплуатируемыми газотранспортными системами.

Проблемами решения отдельных задач занимается несколько ведомственных научно-исследовательских и проектных институтов и институтов НАН Украины, в том числе Институт общей энергетики НАН Украины, имеющий большой опыт в исследовании газотранспортных систем, управлении их функционированием, создании методов и средств комплексного, согласованного решения всей совокупности этих задач [3],[4].

Очень важным объектом магистрального газопровода является компрессорная станция (КС). В отличие от линейного участка, КС — активный элемент, на ней располагаются газоперекачивающие агрегаты и аппараты воздушного охлаждения (АВО), с помощью которых компенсируется падение давления газа за счет затрат на трение в линейной части газопровода. Специфическими объектами КС являются ее входной и выходной шлейфы, а также обвязка ГПА.

В Институте общей энергетики была предложена математическая модель компрессорной станции, которая подробно описана в [3],[4]. Математическая модель КС представляет собой объединение математических моделей ГПА, АВО и узлов, которые связывают КС с системой магистральных газопроводов.

Основной характеристикой ГПА является сте-

$$\text{пень повышения давления: } \varepsilon = \frac{P_{2n}}{P_{1n}}, \quad (1)$$

где P_{1n}, P_{2n} — соответственно давление на входе и выходе ГПА.

Степень повышения давления зависит от относительной частоты вращения n и приведенного объемного расхода Q_{np}

$$\varepsilon = \varepsilon(n, Q_{np}). \quad (2)$$

Характеристики (2) являются исходными данными для расчетов, они задаются в виде набора графиков. В таком же виде задаются политропный КПД η_n

$$\eta_n = \eta(Q_{np}), \quad (3)$$

и приведенная относительная внутренняя мощность нагнетателя N

$$\left(\frac{N_i}{\rho_{1n}} \right)_{np} = \frac{N_i}{\rho_{1n}}(Q_{np}) \quad (4)$$

При дальнейших расчетах зависимости (2)-(4) аппроксимируются полиномами второго-третьего порядка, причем из семейства характеристик выбирается одна кривая.

Основная проблема, которая встречается во время работы с газодинамическими характеристиками (2)-(4), состоит в том, что они нестабильны в эксплуатационных условиях. Реальные характеристики центробежных нагнетателей (ЦБН) в той или иной степени отличаются от паспортных. Причины этих отклонений состоят в отличии характеристик отдельных агрегатов в пределах технических условий на поставку заводов-изготовителей, а также в ухудшении технического состояния агрегатов в процессе эксплуатации вследствие эрозионного износа проточной части и нарушения уплотнения. Таким образом, прямое использование газодинамических характеристик ЦБН в том виде, в котором они приведены в паспорте нагнетателя (номинальные характеристики), дает неадекватные результаты. Прежде, чем выполнять непосредственный расчет режимов работы агрегатов, необходимо идентифицировать фактические характеристики ЦБН, что осуществляется с помощью коэффициентов технического состояния по политропному напору и по политропному КПД. (Характеристика по приведенной относительной внутренней мощности в данном случае является "замыкающей" и рассчитывается с учетом фактически полученных первых двух коэффициентов).

Для получения коэффициентов технического состояния ЦБН и, соответственно, их скорректи-

рованных газодинамических характеристик (2)-(4), необходимо знать реальный (с учетом внутренних стационарных перетоков) расход перекачиваемого агрегатами КС газа. На работающих газопроводах вопрос определения расхода газа через ГПА до сих пор полностью не решен. Замеры расхода газа по трубопроводам выполняются на границах производственных объединений с помощью замерных узлов.

Оперативно расчет фактического расхода газа через каждый ГПА можно выполнить на основе данных фактических режимов работы оборудования КС и индивидуальной фактической мощности привода ГПА. Поэтому объективная и оперативная оценка мощности и технического состояния газотурбинной установки (ГТУ) ГПА также имеет большое информационное значение как для обеспечения надежности технологического процесса транспортирования газа, так и для текущего и прогнозного анализа работы газотранспортной системы. Изменения технического состояния ГТУ идентифицируются с помощью коэффициента технического состояния $K_{\text{те}}$, который определяет располагаемую мощность N_{ep} установки в данных условиях, а также коэффициента технического состояния ГТУ по расходу топлива (тепла) $K_{\text{тл}}$, который определяет расход топлива при фактической мощности компримирования $Q_{\text{тл}}$ [2]:

$$N_{ep} = N_{e_0} \cdot K_{N_e} \cdot \left(1 + K_{T_e} \cdot \frac{T_3 - T_{3_0}}{T_{3_0}} + K_{P_e} \cdot \frac{P_a - P_{a_0}}{P_{a_0}} \right), \quad (5)$$

$$Q_{\text{тл}} = Q_{\text{тл}_0} \cdot K_{\text{тл}} \cdot \left(0,75 \cdot \frac{N_e}{N_{e_0}} + 0,25 \cdot \sqrt{\frac{T_3}{T_{3_0}} \cdot \frac{P_a}{P_{a_0}}} \right) \cdot \frac{Q_{\text{тл}_0}^p}{Q_{\text{тл}}^p}, \quad (6)$$

где K_{T_e} — коэффициент влияния температуры воздуха на входе в компрессор ГТУ на её мощность,

K_{P_e} — коэффициент влияния атмосферного давления на мощность ГТУ.

T_3 — температура воздуха на входе в компрессор,

P_a — атмосферное давление,

$Q_{\text{тл}}^p$ — низшая теплота сгорания топливного газа.

Индексом "0" обозначены номинальные значения параметров.

На данное время разработан ряд методов определения мощности ГПА: по мощностному параметру ГТУ, по перепаду на конфузоре осевого компрессора, по параметрам и характеристикам центробежного нагнетателя, но они требуют, как правило, для своей реализации организации специальных замеров с использованием измери-

тельных приборов высокого класса точности. По этой причине данные методы используются только при выполнении специальных и контрольных испытаний. Организовать замеры необходимых параметров агрегатов для постоянной оценки на каждой компрессорной станции дополнительно загрузки ГПА и, что не менее важно, технического состояния приводных ГТУ достаточно проблематично, учитывая технические и временные возможности эксплуатационного персонала, поскольку список параметров, как правило, выходит за рамки штатного набора.

Для последующего использования в оперативных диспетчерских расчётах был разработан метод определения загрузки и технического состояния ГТУ, ориентированный на штатный набор измеряемых на агрегате параметров [1]. В основу этого метода положено совместное оперирование базовым параметром, который идентифицирует при любом техническом состоянии мощность ГТУ, и управляющим параметром, по которому персонал судит о степени загруженности агрегата. При выборе базового параметра ГТУ к нему предъявляются требования стабильной функциональной зависимости от мощности ГТУ в диапазоне загрузки агрегата и вхождения в состав штатного набора измеряемых параметров. Требования, которым должен отвечать управляющий параметр, — это возможность простого и качественного замера в составе штатного набора измеряемых параметров и связь с законом регулирования ГТУ.

Разнообразие типов ГТУ, которые эксплуатируются на газотранспортных предприятиях, обуславливают выбор разных базовых и управляющих параметров и функциональных зависимостей между ними (коэффициентов взаимного влияния) для разных типов ГТУ.

Сравнительный анализ зависимости фактической мощности ГТУ от ряда входных параметров выявил наиболее целесообразным использовать для ГТУ с однокаскадным воздушным компрессором (ГТК-5, ГТ-750-6, ГТ-6-750, ГТН-6, ГПА-Ц-6,3, ГТК-10, ГТК-10И, ГТН-16) в качестве базового параметра давление воздуха на выходе осевого компрессора (ОК), а в качестве управляющего параметра — значение температуры продуктов сгорания перед турбиной или за ней.

Для ГТУ с двухкаскадным воздушным компрессором (ГПА-Ц-16, ГТН-25) в качестве базового параметра используется значение частоты вращения вала высокого давления, в качестве управляющего параметра — значение оборотов вала низкого давления.

Для агрегатов ГПУ-10 и ГПУ-16, которые регулируются по частоте вращения вала высокого давления, в качестве базового параметра принимается значение частоты вращения вала низкого

давления, а в качестве управляющего — значение частоты вращения вала высокого давления.

Математическим аппаратом получения коэффициентов взаимного влияния ГТУ является метод малых отклонений. Получение искомых зависимостей мощности ГТУ от управляющего параметра и внешних условий обеспечивается решением на ЭВМ системы линейаризованных уравнений рабочего процесса при соответствующих законах регулирования ГТУ. При определении зависимостей параметров принимается во внимание, что при варьировании режимов работы ГТУ техническое состояние основных элементов ее проточной части не изменяются мгновенно. Необходимые зависимости получаются из общей таблицы коэффициентов взаимного влияния с использованием изменений управляющего параметра и параметров окружающей среды.

Проверка адекватности полученных коэффициентов влияния проведена по основным выходным параметрам ГТУ (мощность, расход, температура и давление воздуха и продуктов сгорания, частота вращения валов турбокомпрессора), которые контролируются прямыми измерениями. В большинстве случаев используются коэффициенты взаимного влияния, соответствующие номинальному режиму работы ГТУ. Проведенные исследования показали, что на фактических режимах, близких к номинальному, изменения коэффициентов влияния составляют 2-3%. При значительном (более 70%) отклонении от номинального режима работы агрегата целесообразно изменить схему работы цеха КС.

Рассмотрим получение результирующих зависимостей на примере ГТУ с однокаскадным компрессором (ГТК-5, ГТ-750-6, ГТ-6-750, ГТН-6, ГПА-Ц-6,3, ГТК-10, ГТК-10И, ГТН-16).

Расчётное изменение давления на выходе осевого компрессора dP_{4K} определяется следующим образом:

$$\delta P_{4K} = \frac{\delta P_{4K}}{\delta T_T} \cdot \delta T_T + \frac{\delta P_{4K}}{\delta T_3} \cdot \delta T_3 + \frac{\delta P_{4K}}{\delta P_{II}} \cdot \delta P_{II}. \quad (7)$$

Здесь $\frac{\delta P_{4K}}{\delta T_T}, \frac{\delta P_{4K}}{\delta T_3}, \frac{\delta P_{4K}}{\delta P_{II}}$ — коэффициенты взаимного влияния температуры продуктов сгорания (перед или за турбиной — управляющий параметр), температуры воздуха на входе ОК, атмосферного давления на изменение давления воздуха на выходе осевого компрессора; $\delta T_T, \delta T_3, \delta P_{II}$ — относительные изменения параметров от значения на номинальном ("нулевом") режиме работы агрегата;

$$\delta T_T = \frac{T_T - T_{T_0}}{T_{T_0}}, \quad (8)$$

где T_{T_0} — номинальное значение температуры продуктов сгорания;

T_T — значение температуры на текущем режиме;

P_H, T_3 — соответственно давление и температура воздуха на входе в ОК.

Фактическая мощность ГТУ N_{ef} определяется по формуле:

$$N_{ef} = (1 + \frac{\delta N_c}{\delta P_{4k}} \cdot \delta P_{4k\phi} + \frac{\delta N_c}{\delta T_3} \cdot \delta T_3 + \frac{\delta N_c}{\delta P_H} \cdot \delta P_H) \cdot N_{c0} \quad (9)$$

Здесь

$\frac{\delta N_c}{\delta P_{4k}}, \frac{\delta N_c}{\delta T_3}, \frac{\delta N_c}{\delta P_H}$ — коэффициенты взаимного влияния параметров на мощность ГТУ N_e при регулировании по закону $P_{4k} = var$;

N_{c0} — номинальная мощность ГТУ;

$$\delta P_{4k\phi} = \frac{P_{4k\phi} - P_{4k0}}{P_{4k0}} \quad (10)$$

где $P_{4k\phi}, P_{4k0}$ — соответственно давление воздуха на выходе ОК на фактическом и расчетном нулевом режиме.

Эталонная мощность ГТУ используется для определения технического состояния по мощности. Под эталонной имеется в виду мощность, которую развивает ГТУ при исправном состоянии ее элементов и текущих значениях управляющего параметра и окружающей среды.

Эта мощность определяется по формуле:

$$N_{c0} = (1 + \frac{\delta N_c}{\delta P_{4k}} \cdot \delta P_{4k} + \frac{\delta N_c}{\delta T_3} \cdot \delta T_3 + \frac{\delta N_c}{\delta P_H} \cdot \delta P_H) \cdot N_{c0} \quad (11)$$

Коэффициент технического состояния ГТУ по мощности:

$$K_{N_c} = \frac{N_{c\phi}}{N_{c0}} \quad (12)$$

В ГТУ с двухкаскадным компрессором в большей степени проявляется влияние технических отклонений. Кроме того, в конвертированных из авиационных двигателей ГТУ, газогенераторы которых ремонтируются в заводских условиях, возможны значительные корректировки от проектных значений геометрии и рабочих параметров по сечениям двигателя с целью получения номинальных выходных характеристик. Это приводит к тому, что эксплуатационные параметры, которые соответствуют основным выходным параметрам, отличаются от двигателя к двигателю. Индивидуальный характер процессов, которые имеют мес-

то в ГТУ, отражается в дроссельных характеристиках, которые приведены в формуляре двигателя и действуют на предстоящий эксплуатационный период. Эта особенность использована при определении мощности агрегатов ГПА-Ц-16, которые регулируются по закону $n_{HT} = var$. Для агрегатов ГТН-25 при отсутствии формуляров с индивидуальными дроссельными характеристиками используются также значения параметров теплового расчета, которые принимаются как среднестатистические для всего парка эксплуатируемых агрегатов этого типа.

Особенностью агрегатов ГПУ-10, ГПУ-16, кроме регулирования по частоте вращения вала высокого давления (ВД) в соответствии с характеристиками загрузки, является отсутствие индивидуальной информации по базовому параметру (характеристика загрузки оперирует лишь значениями частоты вращения вала ВД), а также существенное корректирование закона регулирования при $t_3 \geq 250^\circ C$ ($t_3 \geq 150^\circ C$ для ГПУ-16) — переход с $n_{ВД} = f(T_3) = var$ на $n_{ВД} = f(T_3) = const$. Эта особенность заставляет при использовании данного метода наряду с известными паспортными значениями параметров $n_{ВД}, N_{c0}$ оперировать номинальной частотой вращения вала низкого давления (по формуляру).

При определении фактических расходов газа применяется концепция использования наряду с параметрами компримируемого газа индивидуальной фактической мощности ГПА, которая через полный напор связана с расходом через ЦБН или их группу. Фактическая мощность для газотурбинных ГПА находится одновременно с определением коэффициента технического состояния ГТУ по формуле (12). Распределение потоков газа по цехам КС, то есть определение коммерческого расхода газа через каждый цех, производится пропорционально фактической располагаемой мощности каждого КЦ и всей КС в целом с учетом технического состояния нагнетателей работающих ГПА:

$$N_i = N_{c\phi} - \Delta N_{мех} \quad (13)$$

$$Q_i = \frac{N_i}{H_{полн} \cdot P_{III}} \cdot 60 \quad (14)$$

где $N_{c\phi}$ — фактическая полная мощность i-го привода;

N_i — мощность i-го привода;

$\Delta N_{мех}$ — механические потери на i-м приводе;

$H_{полн}$ — политропный напор;

P_{III} — давление газа на входе ЦБН (избыточное), [кг/см²].

Коэффициенты технического состояния ЦБН по политропному напору и по политропному КПД определяются на основе полученных значений

фактических расходов газа через ГПА и последующих замеров параметров фактического режима:

- давления газа на входе и выходе ЦБН;
- температуры газа на входе и выходе ЦБН;
- плотности газа при нормальных условиях (20°C, 760 мм. рт.ст.);
- фактической частоты вращения ротора ЦБН на режиме.

На основании полученных коэффициентов технического состояния и паспортных газодинамических характеристик ЦБН осуществляется расчет скорректированных характеристик ЦБН, которые соответствуют фактическому техническому состоянию агрегата. Предварительно производится "калибровка" альбомных характеристик, т.е. их корректировка при коэффициентах технического состояния по политропному напору и политропному КПД равными 1,0.

Исходными данными для корректировки характеристик ЦБН являются:

- коэффициенты аппроксимации выходных характеристик ГПА;
- нормативно-справочная информация по ЦБН: номинальное значение степени повышения давления, минимальное и максимальное значение приведенной подачи, номинальная частота вращения ротора;
- параметры приведения;
- индивидуальные коэффициенты технического состояния выбранного агрегата.

В процессе расчетов производится пересчет выходных характеристик ЦБН в абсолютных значениях параметров $\varepsilon = \varepsilon(p, Q_{np})$ к критериальным, в относительных значениях

$$\left(\frac{N_i}{\rho_{II}} \right)_{np} = \varphi(Q_{np}), \quad (15)$$

где N_i — внутренняя мощность ЦБН,

ρ_{II} — начальная (на входе нагнетателя) плотность газа.

Непосредственная корректировка газодинамических характеристик (2)-(4), то есть расчет фактических, с учетом технического состояния, характеристик ЦБН, производится в относительном критериальном виде, ибо анализ характеристик ЦБН различных типов, находящихся в разном техническом состоянии, показал, что относительные критериальные характеристики изменяются значительно меньше, чем характеристики в абсолютных значениях параметров. Далее проводится пересчет скорректированных характеристик ЦБН в относительных критериальных значениях к абсолютным значениям параметров.

В качестве сравнительного примера на рисунке приведены газодинамические характеристики для номинального (черная линия) и ухудшенного состояния проточной части (серая линия) для ЦБН:

- ЦБН НЦ-16-76./1,44 $K_{NII} = 0,949$;
 $K_{KПДII} = 0,873$ — рис.1-3;
- RF-2BB-36 $K_{NII} = 0,950$; $K_{KПДII} = 0,995$ — рис.4-5.

Скорректированные таким образом характеристики нагнетателей газа используются в дальнейшем при расчетах режимов работы компрессорных цехов. Погрешности результатов, полученных с использованием предложенных методик оперативного диагностирования ГПА, составляют 4-6%, что является вполне приемлемым для проведения диспетчерских расчетов режимов и позволяет более адекватно промоделировать работу газотранспортной системы.

1. Вертепов А.Г. Экспресс-метод оценки загрузки и технического состояния ГТУ/ Совершенствование машин и агрегатов газовой промышленности. — М.: ВНИИГАЗ, 1994. — С.44-52.

2. Волков М.М., Михеев А.Л., Конев К.А. Справочник работника газовой промышленности. — М.: Недра, 1989 — 286 с.

3. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. — Киев: Наукова думка, 1987. — 200 с.

4. Кулик М.Н., Костюковский Б.А., Линецкий И.К. и др. Оптимизация республиканского топливно-энергетического комплекса и его отраслевых систем. — Киев: Наукова думка, 1992. — 215 с.

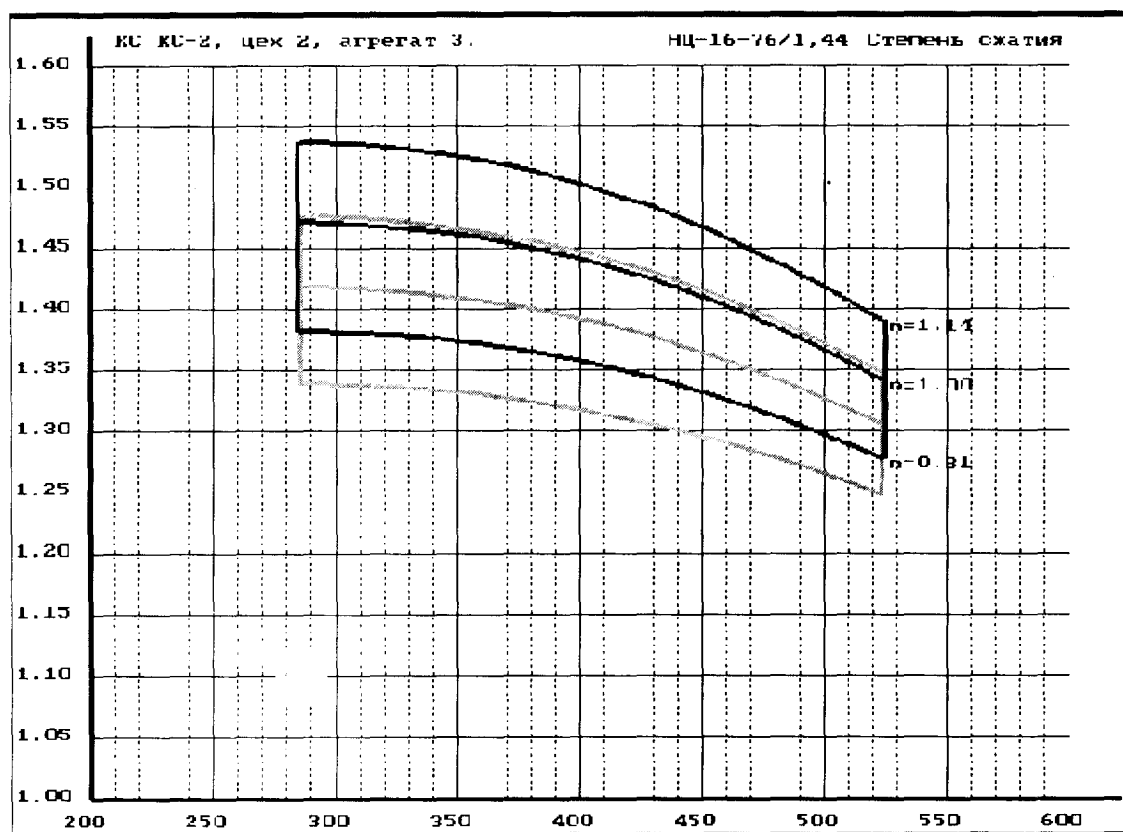


Рис. 1

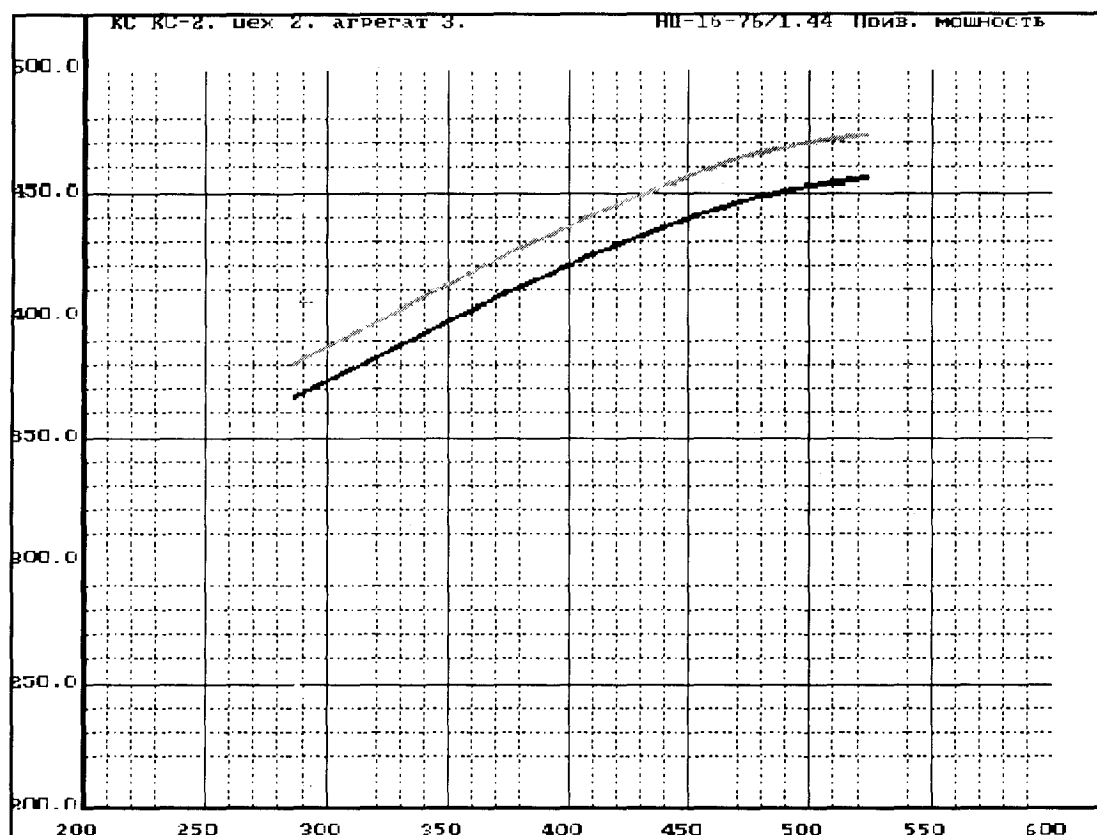


Рис. 2

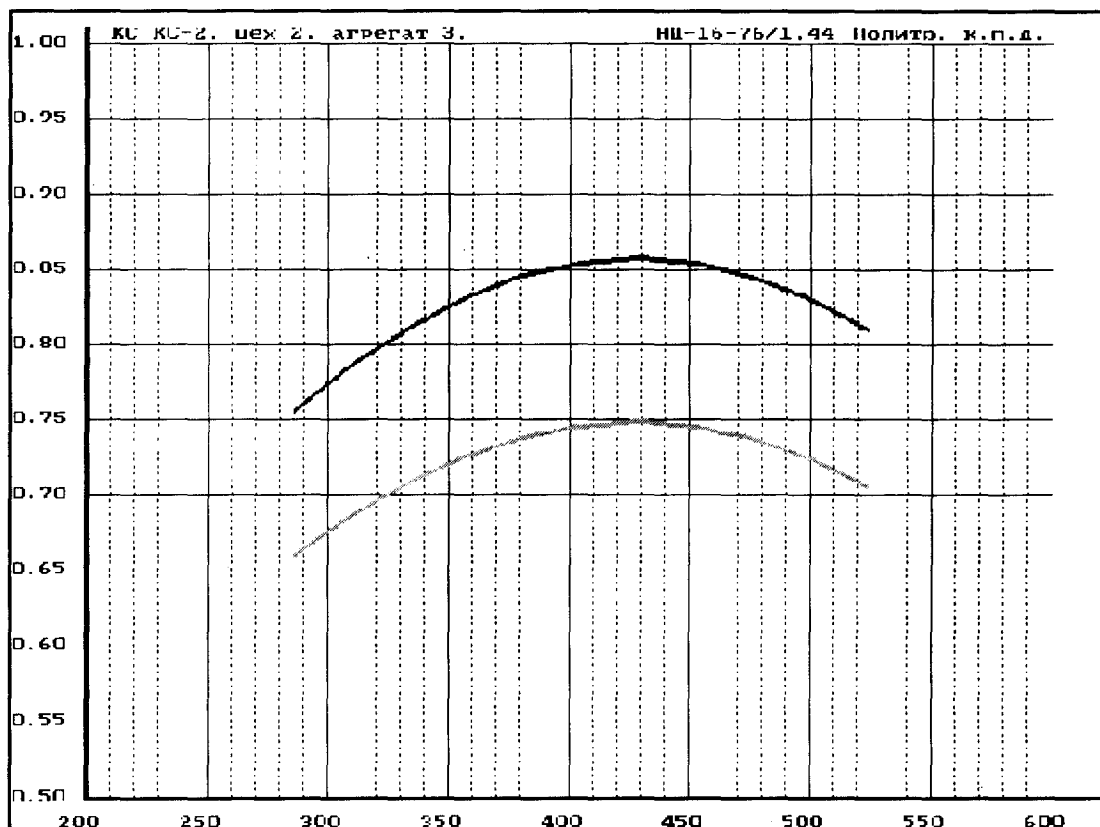


Рис. 3

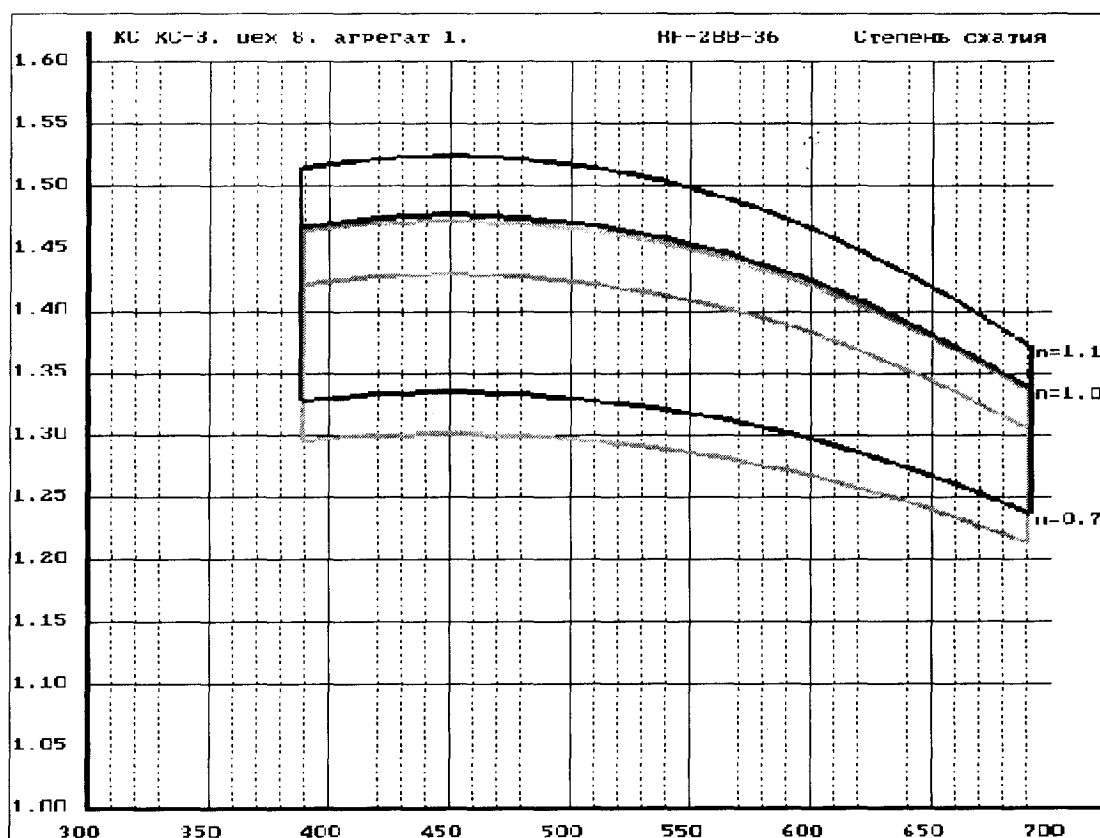


Рис. 4

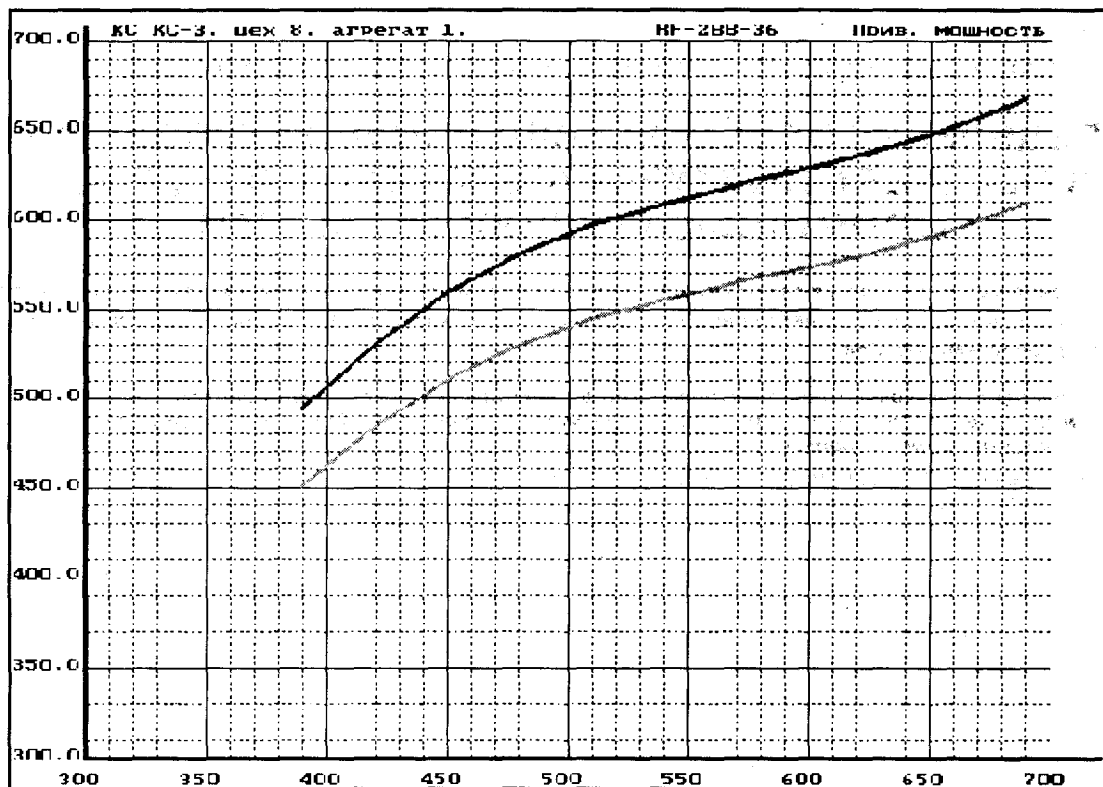


Рис. 5

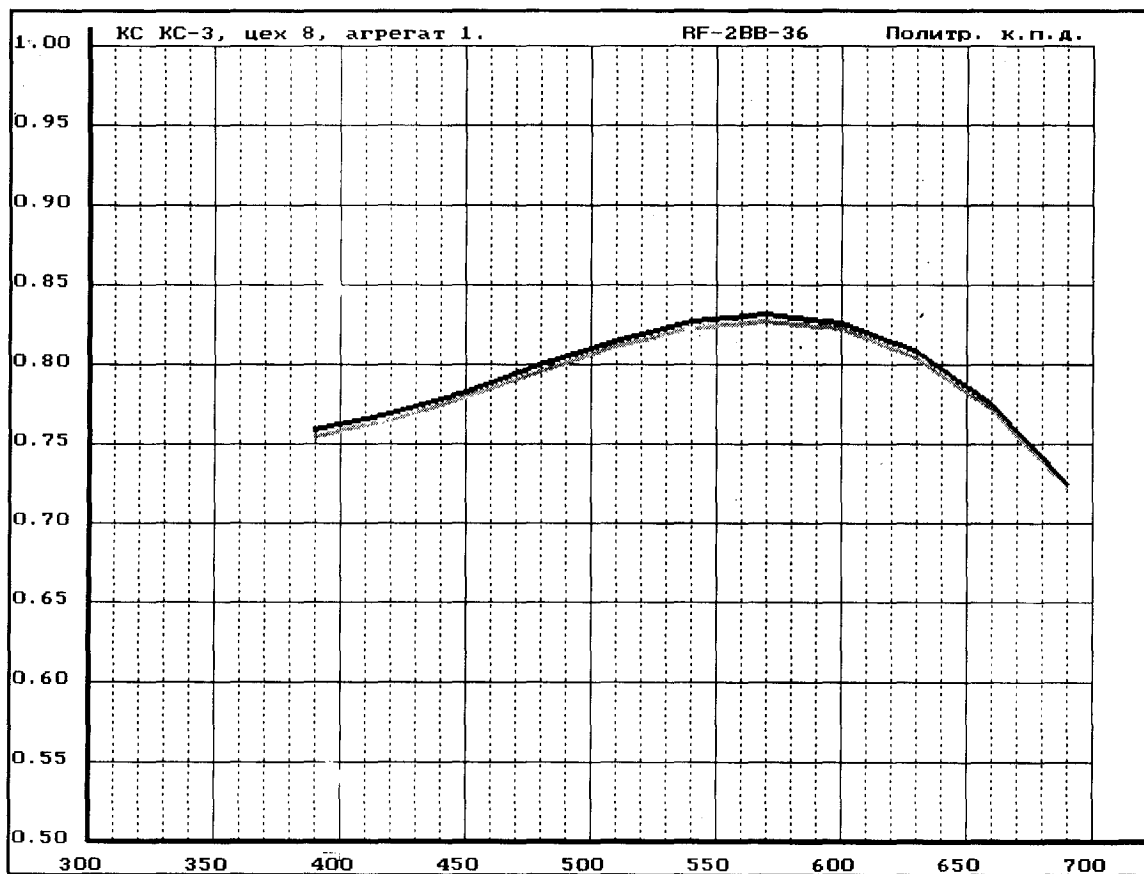


Рис. 6