

УДК 622.691.4.052

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАБОТЫ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА ПРИ РАЗНЫХ ВАРИАНТАХ ВКЛЮЧЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Ванчин А.Г.

*РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва*  
*e-mail: alex\_vanchin@mail.ru*

**Аннотация.** Данное исследование посвящено определению методов оценки работы аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа при разных вариантах включения вентиляторов. Установление фактических характеристик АВО газа с разными вариантами включения вентиляторов необходимо при выборе оптимальных решений технологических задач. В статье предложена методика, дающая возможность оценивать разные варианты включения АВО, используя которую эксплуатирующий персонал компрессорной станции (КС) магистрального газопровода получит возможность повышать эффективность работы узла охлаждения газа на КС за счет варьирования количества введенных в работу секций АВО газа, количества и порядка включения вентиляторов.

**Ключевые слова:** диагностика, транспорт природного газа, характеристика, аппарат воздушного охлаждения, коэффициент технического состояния, техническое состояние, режим работы

### **Основные требования к разрабатываемым методам и описание расчетной схемы, используемой при проведении исследования**

Эксплуатирующий персонал компрессорной станции магистрального газопровода имеет возможность варьировать количество введенных в работу секций аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа, количество и порядок включения вентиляторов.

Все эти действия влияют на эффективность работы узла охлаждения газа на КС, поэтому для объективной оценки в распоряжении эксплуатирующего персонала КС должна быть методика, дающая возможность оценивать разные варианты включения АВО.

При решении технологических задач необходима тепловая характеристика АВО, аэродинамическая характеристика вентилятора совместно с теплообменной секцией для определения величин теплообмена и затрат электроэнергии на работу вентиляторов, а также гидравлическая характеристика АВО для определения потерь давления газа на АВО при соответствующих расходе и параметрах газа.

Необходимо, чтобы указанные характеристики были получены в аналитическом виде для организации автоматизированных расчетов.

Для обеспечения практической реализации использования характеристик АВО при оценке и оптимизации режима газотранспортного узла требуется также решение такой задачи, как получение действительной тепловой характеристики АВО для режимов работы аппаратов не только со всеми включенными вентилято-

рами, но и с одним включенным вентилятором (первым или вторым) и для полностью пассивного режима.

Для этого нами была разработана программа для полного расчета АВО на основе методологии, изложенной в работах [1 - 4]. Программа при проведении расчетов не требует ручного ввода данных из эмпирических закономерностей в виде таблиц или графиков. Все необходимые для расчетов зависимости введены в программу в аналитическом виде.

В основе расчета лежит главное уравнение теплового баланса и мощности теплообменного аппарата применительно к АВО:

$$Q_{ABO} = G_g \cdot c_{pm.g} \cdot (t_{g1} - t_{g2}) = G_z \cdot c_{pm.z} \cdot (t_{z1} - t_{z2}) = k \cdot F \cdot \theta, \quad (1)$$

где  $Q_{ABO}$  – тепловая мощность АВО, кВт;  $G_g$  – средний массовый расход воздуха через АВО, кг/с;  $G_z$  – средний массовый расход газа через АВО, кг/с;  $c_g$  – средняя удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);  $c_z$  – средняя удельная теплоемкость газа, кДж/(кг·К);  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $t_{z1}, t_{z2}$  – значение температуры природного газа на входе и выходе АВО, °С;  $t_{g1}, t_{g2}$  – значение температуры воздуха на входе и выходе АВО, °С;  $\theta$  – средний логарифмический температурный напор, К.

Средний логарифмический температурный напор, иначе еще называемый средней логарифмической разностью температур, между теплоносителями для противоточной схемы их движения рассчитывается по уравнению Грасгофа:

$$\theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}}, \quad (2)$$

где  $\theta_1, \theta_2$  – температурные напоры по концам аппарата:

$$\theta_1 = t_{z1} - t_{g2}, \quad \theta_2 = t_{z2} - t_{g1}.$$

Коэффициент теплопередачи от природного газа к атмосферному воздуху в АВО, отнесенный к площади поверхности оребренных труб аппарата  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_z} \varphi + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_g}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_z, \alpha_g$  – коэффициенты теплоотдачи от природного газа в внутренней поверхности теплообменных труб и от наружной поверхности труб к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\varphi = F_{p.cm} / F_n$  – коэффициент оребрения теплообменных труб;  $F_{p.cm}, F_n$  – площадь наружной поверхности оребренных труб и площадь наружной поверхности теплообменных труб при отсутствии оребрения, м<sup>2</sup>;

$\sum R_i$  – сумма термических сопротивлений стенки теплообменной трубы и загрязнений на внутренней и наружной поверхности труб,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ .

Массовый расход газа через один АВО  $G$ , кг/с, вычисляют следующим образом:

$$G = \frac{G_{\text{вог}}}{n_{\text{АВО}}}, \quad (4)$$

где  $n_{\text{АВО}}$  – общее количество включенных АВО газа, шт.  $G_{\text{вог}}$  – массовый расход через всю установку охлаждения газа, кг/с.

### **Разработка методов получения действительной характеристики АВО для разных вариантов включения вентиляторов**

Рассмотрим вопрос получения действительной характеристики АВО для режимов работы аппаратов с одним включенным вентилятором и для пассивного режима (с выключенными вентиляторами).

На первом этапе в качестве исходной посылки для расчетов примем, что весь расход воздуха через половину секции с выключенным вентилятором обеспечивается за счет «всплывания» более теплого, по сравнению с внешним, воздуха в межтрубном пространстве теплообменной секции. Перепад давления, создаваемого в этом процессе «архимедовой» силой рассчитывается по формуле:

$$\Delta p_{\text{арх}} = g \cdot h_c \cdot (\rho_{\text{в1}} - \rho_{\text{вср}}), \quad (5)$$

где  $\Delta p_{\text{арх}}$  – перепад давления, создаваемый «архимедовой» силой, Па;  $g = 9.81$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $h_c$  – высота секции АВО, м;  $\rho_{\text{в1}}$  – плотность воздуха на входе в АВО,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{вср}}$  – средняя плотность воздуха в межтрубном пространстве теплообменной секции АВО,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

На рис. 1 показаны результаты расчетов зависимостей тепловой мощности от расхода газа для АВО газа типа 2АВГ-75 при разных вариантах включения вентиляторов. Расчеты производились при условиях сохранения неизменными во всех случаях геометрических характеристик АВО, давлений и температур газа и воздуха на входе в аппарат, уровней и параметров загрязнений. Были просчитаны варианты работы полной секции при выключенных вентиляторах, работы первой половины секции при выключенном на ней вентиляторе, и работы второй половины секции при выключенном вентиляторе на ней и включенном вентиляторе на половине секции перед нею.

По графикам на рис. 1 видно, что тепловая мощность первой половины секции при выключенном на ней вентиляторе равна примерно половине тепловой мощности полной секции при выключенных вентиляторах. Это объясняется тем, что из-за малого теплообмена температура газа меняется не настолько значитель-

но, чтобы появилась большая разница в тепловой мощности первой и второй половин полной секции, работающей при выключенных вентиляторах.

По графикам на рис. 1 также видна значительная разница тепловой мощности при работе первой половины секции с выключенным на ней вентилятором, и при работе второй половины секции с выключенным вентилятором на ней и включенным вентилятором на половине секции перед нею. Это очевидно объясняется тем, что из-за работы первой половины секции с включенным вентилятором заметно снижается температура газа перед входом во вторую половину секции.

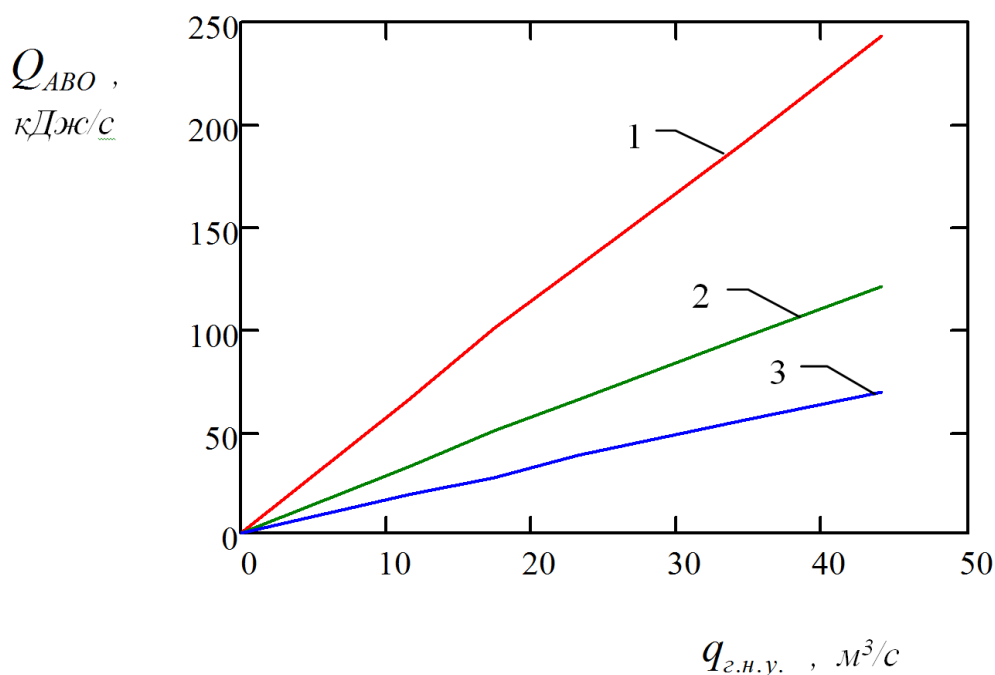


Рис. 1. Графики зависимостей тепловой мощности от расхода газа для АВО газа типа 2АВГ-75 при разных вариантах включения вентиляторов:

- линия 1 – для полной секции при выключенных вентиляторах;
- линия 2 – для первой половины секции при выключенном на ней вентиляторе;
- линия 3 – для второй половины секции при выключенном вентиляторе на ней и включенном вентиляторе на половине секции перед нею

На рис. 2 показаны результаты расчетов зависимостей тепловой мощности от расхода газа для АВО газа типа 2АВГ-75 для полной секции при включенными вентиляторами, для полной секции с включенным первым вентилятором и выключенным вторым вентилятором (см. рис. 3а), для полной секции с выключенным первым вентилятором и включенным вторым вентилятором (см. рис. 3б), и для полной секции при выключенных вентиляторах. Расчеты производились при условиях сохранения неизменными во всех случаях геометрических характеристик АВО, давлений и температур газа и воздуха на входе в аппарат, уровней и параметров загрязнений.

По графикам на рис. 2 видно, что тепловая мощность у полной секции с включенным первым вентилятором и у полной секции с включенным вторым вентилятором примерно совпадает. Расчеты показали, что такой результат наблюдается и для других моделей АВО, и при изменении условий на входе в АВО. Однако, это справедливо только для исходной посылки, что весь расход воздуха через половину секции с выключенным вентилятором обеспечивается за счет «всплывания» более теплого, по сравнению с внешним, воздуха в межтрубном пространстве теплообменной секции.

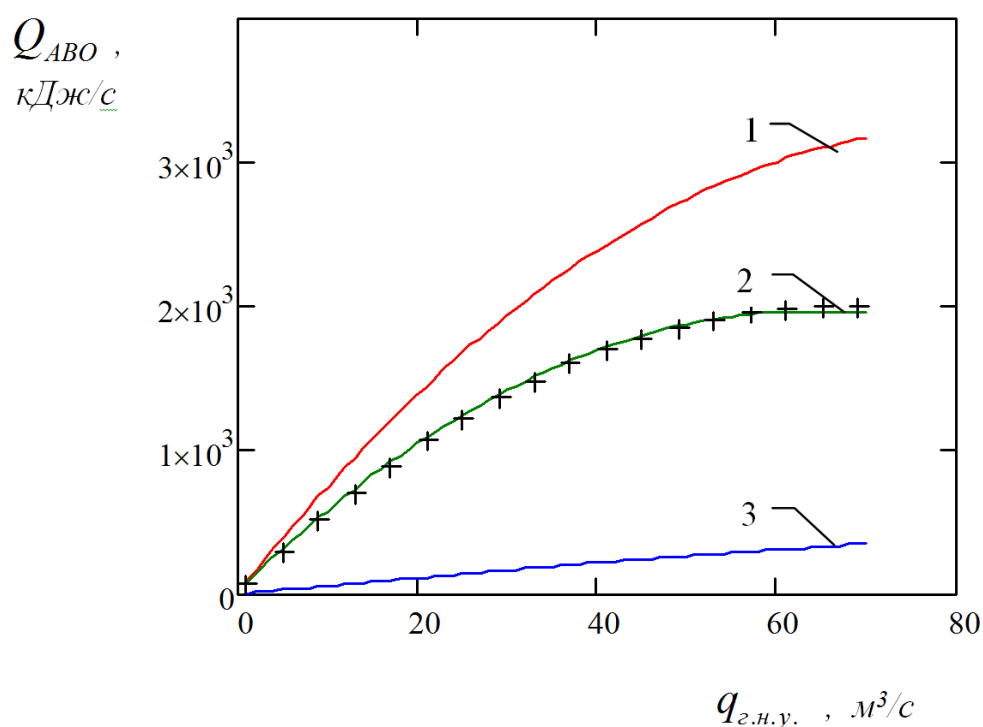


Рис. 2. Графики зависимостей тепловой мощности от расхода газа для АВО газа типа 2АВГ-75 при разных вариантах включения вентиляторов:

- линия 1 – для полной секции при включенными вентиляторами;
- линия 2 – для полной секции с выключенным первым вентилятором и включенным вторым вентилятором;
- линия 3 – для полной секции при выключенных вентиляторах;
- знаками «+» показан график для полной секции с включенным первым вентилятором и выключенным вторым вентилятором

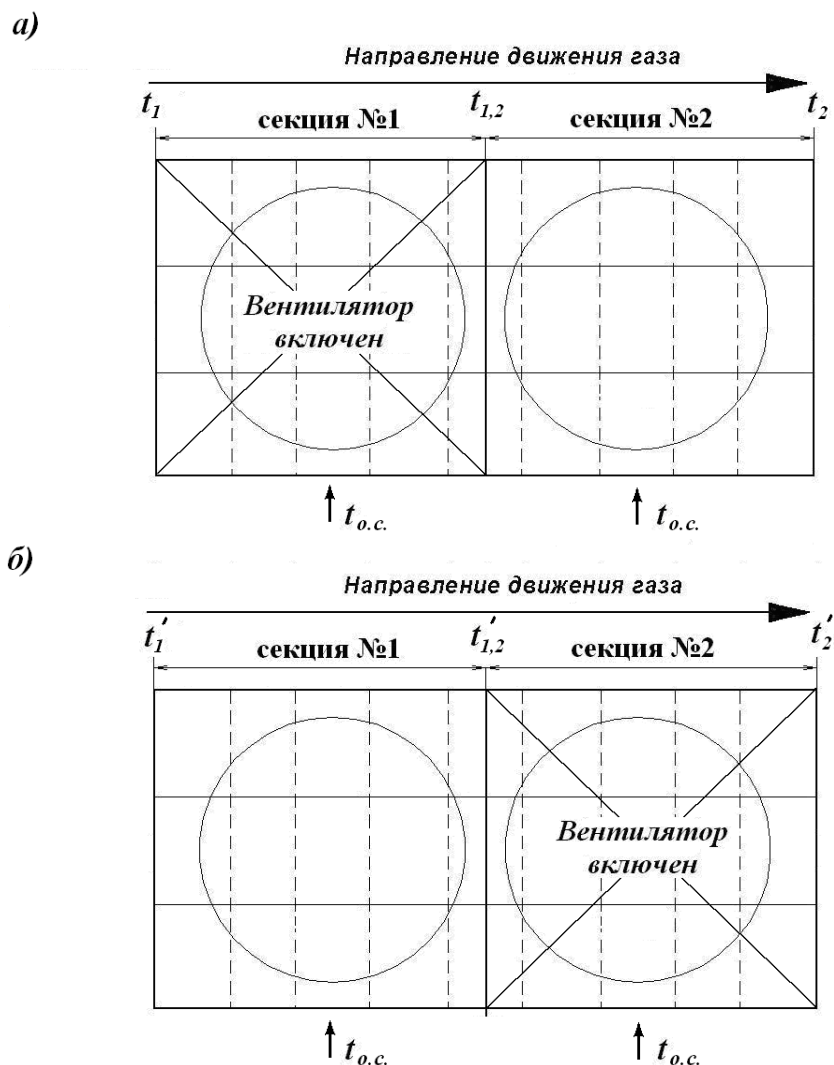


Рис. 3. Схема работы секции АВО на разных режимах:

- а) первый режим – включен первый по ходу движения газа вентилятор, второй отключен;  
 б) второй режим – включен второй по ходу движения газа вентилятор, первый отключен;

Секции №1 и №2 половины полной теплообменной секции;

$t_{o.c.}$  – температура воздуха в окружающей среде;

$t_1, t_{1,2}, t_2$  – для режима а) температуры газа соответственно на входе в первую половину секции, на входе во вторую половину секции, на выходе из второй половины секции;

$t'_1, t'_{1,2}, t'_2$  – те же параметры для режима б).

Картина будет неполной, если не рассмотреть такие факторы, как воздействие работающих соседних вентиляторов и ветра.

Воздействие работающих соседних вентиляторов связано с тем, что при их работе создается некоторое наведенное, иначе говоря «индуцированное» отрицательное давление воздуха на входе в АВО и избыточное на выходе. В результате этого через половину секции, если на ней выключен вентилятор, может происхо-

дить обратное движение воздуха из-за работы вентиляторов на соседних аппаратах и на другой половине этой же секции.

Так как давление, создаваемое соседними вентиляторами пропорционально расходу воздуха через них в квадрате, то индуцированный перепад давления, создаваемый соседними вентиляторами можно приблизительно учитывать с помощью формулы:

$$\Delta p_{инд} = -K_{прим} \cdot \sum_{i=1}^a G_{B.i}^2 - K_{диаг} \cdot \sum_{i=1}^b G_{B.i}^2, \quad (6)$$

где  $\Delta p_{инд}$  – индуцированный перепад давления, создаваемый соседними вентиляторами, Па;  $K_{прим}$  – коэффициент влияния вентилятора с примыкающей половины секции;  $K_{диаг}$  – коэффициент влияния вентилятора с диагонально расположенной половины секции;  $G_{B.i}$  – массовый расход воздуха через вентилятор, кг/с;  $a$  – количество включенных вентиляторов на примыкающих половинах секций;  $b$  – количество включенных вентиляторов на диагонально расположенных половинах секций.

Величины коэффициентов  $K_{прим}$  и  $K_{диаг}$  для каждого типа АВО должны устанавливаться экспериментально, или в результате дополнительного расчета совместной работы вентиляторов при данных геометрических параметрах установки охлаждения газа.

Влияние индуцированного перепада давления, создаваемого соседними вентиляторами, может нарушить обнаруженную при расчетах тепловую эквивалентность полной секции с включенным первым вентилятором и у полной секции с включенным вторым вентилятором, показанную на рис. Индуцированный перепад давления и перепад давления от «архимедовой» силы разнонаправлены, взаимно вычитаются при работе АВО, и перепад давления от «архимедовой» силы больше на первой половине секции из-за более высокой температуры газа. В результате, на аппарате с включенным первым вентилятором теплоотдача будет иметь другое значение, чем и на аппарате с включенным вторым вентилятором при прочих равных условиях. Этот вывод подтверждается результатами экспериментов по оценке режимов работы АВО на действующей КС [5].

Предсказать результаты воздействия ветра на работу АВО, в силу большой изменчивости этого фактора, сложно. Однако, при проведении испытаний АВО с целью установления фактических характеристик аппарата целесообразно оценивать и этот фактор, применяя соответствующие приборы по измерению направления и скорости ветра.

В целом, полный перепад давления воздуха на половине теплообменной секции АВО складывается как сумма влияний всех факторов:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\Sigma} &= \Delta p_{\text{вент}} + \Delta p_{\text{арх}} + \Delta p_{\text{инд}} + \Delta p_{\text{ветр}} = \\ &= \Delta p_{\text{вент}} + g \cdot h_c \cdot (\rho_{\text{в1}} - \rho_{\text{вср}}) - K_{\text{прим}} \cdot \sum_{i=1}^a G_{B,i}^2 - K_{\text{диаз}} \cdot \sum_{i=1}^b G_{B,i}^2 + \Delta p_{\text{ветр}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\Delta p_{\Sigma}$  – полный перепад давления воздуха на АВО, Па;  $\Delta p_{\text{вент}}$  – перепад давления, создаваемый вентилятором (в пассивном режиме равен нулю), Па;  $\Delta p_{\text{ветр}}$  – перепад давления, создаваемый ветром, Па.

Для учета всех рассмотренных факторов, влияющих на расход воздуха через АВО, расчет рассматриваемой половины теплообменной секции АВО производится в общепринятом порядке [1 - 4], но при этом рассчитанная по формуле (7) величина перепада давления воздуха на АВО подставляется соответствующие выражения вместо величины давления, создаваемого вентилятором.

### Выводы

1. Предложены методы оценки работы АВО газа при разных вариантах включения вентиляторов.
2. Предложенные методы дают возможность установления фактических характеристик АВО газа с разными вариантами включения вентиляторов, что необходимо при выборе оптимальных решений технологических задач.
3. Разработанные методы приспособлены для практического использования эксплуатационным персоналом в условиях КС.

### Литература

1. Методика теплового и аэродинамического расчета аппаратов воздушно-го охлаждения. М.: ВНИИНЕФТЕМАШ, 1982. 97 с.
2. Методика теплового и аэродинамического расчета аппаратов воздушно-го охлаждения типов I АВЗ и I АВГ. М.: ВНИИНЕФТЕМАШ, 1988. 9 с.
3. Мустафин Ф.М., Коновалов Н.И., Гильметдинов Р.Ф. Машины и оборудование газонефтепроводов: учеб. пособие для вузов. Уфа: Монография, 2002. 384 с.
4. Антонова Е.О., Бахмат Г.В., Иванов И.А., Степанов О.В. Теплообмен при трубопроводном транспорте нефти и газа. СПб.: Недра, 1999. 228 с.
5. Фомин А.В. Оценка эффективности режимов работы АВО газа // Новые технологии в газовой промышленности: сборник докладов. Секция 4. Проектирование, сооружение и эксплуатация систем транспорта и хранения газа. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. С. 59 - 60.



## ASSESSMENT METHODS OF AIR COOLING OF GAS DEVICES OPERATION AT DIFFERENT OPTIONS OF FANS ACTUATION

A.G. Vanchin

*Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia*

*e-mail: alex\_vanchin@mail.ru*

**Abstract.** *This research is devoted to the definition of methods of assessment of the work of air cooling of gas devices at different options of turning on of fans. The establishment of the actual characteristics of air cooling of gas devices with different options of turning on of fans is necessary to choose the optimum solutions of technological tasks. The maintaining personnel of a compressor station of the main gas pipeline has a possibility to vary the quantity of the entered into operation sections of air cooling of gas devices, the quantity and the order of turning on the fans. All these actions influence the efficiency of work of the cooling of gas unit on the compressor station, so for the objective assessment, at the disposal of the maintaining personnel of the compressor station there should be a technique, which gives a chance to estimate different options of air cooling of gas devices turning on.*

**Keywords:** *diagnostics, natural gas transport, characteristic, air cooling device, technical condition factor, operating mode*

### References

1. Metodika teplovogo i aerodinamicheskogo rascheta apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya (Procedures for thermal and aerodynamic calculation of air-cooled exchanger). Moscow, VNIINEFTEMASh, 1982. 97 p.
2. Metodika teplovogo i aerodinamicheskogo rascheta apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya tipov I AVZ i I AVG (Procedures for thermal and aerodynamic calculation of air-cooled exchanger I AVZ and I AVG). Moscow, VNIINEFTEMASh, 1988. 9 p.
3. Mustafin F.M., Konovalov N.I., Gil'metdinov R.F. Mashiny i oborudovanie gazonefteprovodov: ucheb. posobie dlya vuzov (Machines and equipment of oil and gas pipelines. Textbook). Ufa, Monografiya, 2002. 384 p.
4. Antonova E.O., Bakhmat G.V., Ivanov I.A., Stepanov O.V. Teploobmen pri truboprovodnom transporte nefiti i gaza (Heat transfer in the pipeline transport of oil and gas). SPb., Nedra, 1999. 228 p.
5. Fomin A.V. Otsenka effektivnosti rezhimov raboty AVO gaza (Evaluating the effectiveness of air-cooling unit operational modes), *Novye tekhnologii v gazovoi promyshlennosti: sbornik dokladov (New technologies in the gas industry: a collection of papers)*. Moscow, RGU nefiti i gaza. PP. 59 - 60.