

УДК 66-97

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРОВ ПИРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ; канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА
(Полоцкий государственный университет);
В.В. УРВАНЦЕВ
(Petroleum Analyzer Corporation, Франция)

Рассматривается возможность определения температур паров выкипающего нефтепродукта в колбе стандартизованного аппарата простой перегонки пирометрическим методом, что позволит скорректировать нагрев испытуемых нефтепродуктов и обеспечить более четкое выполнение требований стандартных методик ко времени падения первой капли (начало кипения) в автоматическом режиме без необходимости ручной корректировки нагрева оператором. С этой целью разработана математическая модель процесса теплообмена между парами нефтепродукта и окружающей средой. Проведен эксперимент и по экспериментальным данным осуществлена проверка разработанной модели теплообмена.

Ключевые слова: анализаторы, фракционный состав, температура, пирометр, теплопередача.

Введение. В современных автоматических анализаторах фракционного состава светлых нефтепродуктов возникает необходимость пирометрического контроля температур нагрева исходных проб испытуемых веществ, что особенно важно в случае загрузки в колбу анализатора продукта с малоизвестными свойствами. Это позволит избежать перегрева и «бурного вскипания» легкокипящих, а также ускорить нагрев высококипящих нефтепродуктов и обеспечить выполнение требований стандартных методик перегонки по времени падения первой капли (начало кипения) в автоматическом режиме без необходимости ручной регулировки нагрева оператором.

Для разработки методики пирометрического управления нагревом предварительно проведем эксперимент с эталонным индивидуальным углеводородом на приборе AD86 5G. Результаты эксперимента представлены на рисунках 1–2.

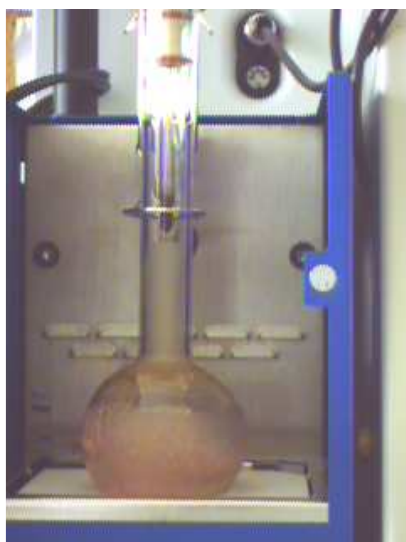


Рисунок 1. – Процесс кипения углеводородов в колбе прибора AD86 5G

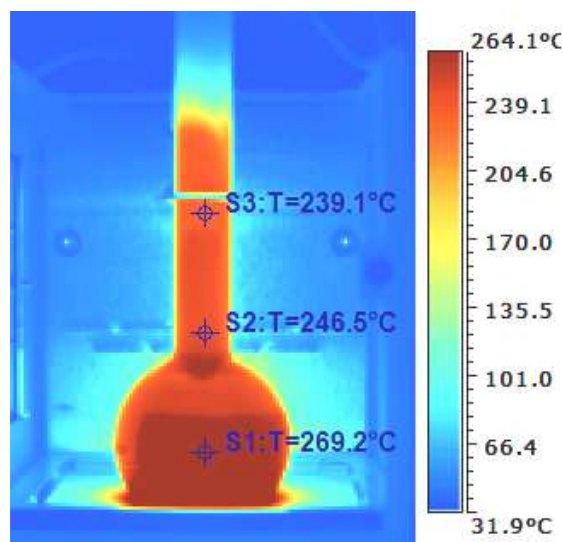


Рисунок 2. – Фотоснимок, полученный с помощью тепловизора (пирометра)

Для разработки математического описания тепловых процессов в колбе составим математическую модель процесса теплопередачи через стенку колбы (рис. 3). Основное уравнение теплопередачи [1]:

$$Q = KF\Delta t, \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи; F – поверхность теплопередачи, m^2 ; Δt – средняя разность температур между конденсирующимся паром и окружающим воздухом.

Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + (\delta/\lambda)_c + 1/\alpha_2}. \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи конденсирующегося пара на вертикальной поверхности α_1 (рис. 4) определяем по следующей формуле [2]:

$$\alpha_1 = 2,04\epsilon_k \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 \lambda_k^3}{\mu_k} \cdot \frac{r_k}{H} \cdot \Delta t_k^{-0,25}}, \quad (3)$$

где представлены теплофизические свойства конденсата: ρ_k – плотность, кг/м³; λ_k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ_k – коэффициент динамической вязкости Па·с; r_k – удельная теплота испарения (конденсации), Дж/кг; H – высота пленки конденсата, м;

$$\Delta t_k = t_k - t_{\text{вн.ст.}}; \quad (4)$$

$(\delta/\lambda)_{\text{ст.}}$ – термическое сопротивление стеклянной стенки.

Поправочная функция $\epsilon_k = \left[\left(\frac{\lambda_{\text{ст.}}}{\lambda_k} \right)^3 \frac{\mu_k}{\mu_{\text{ст.}}} \right]^{1/8}$, учитывающая влияние переохлажденного конденсата

на процесс теплоотдачи. Значение этой функции может быть существенным для вязких конденсатов при больших Δt_k .

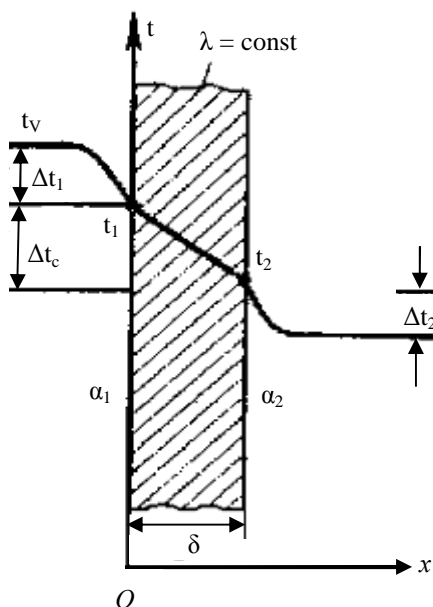


Рисунок 3. – Процесс теплопередачи через стенку колбы

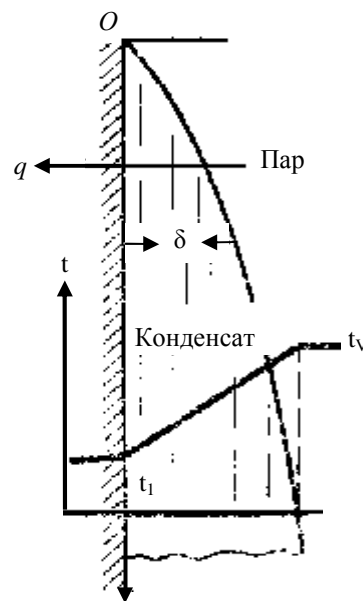


Рисунок 4. – Процесс теплоотдачи при конденсации пара

Коэффициент теплоотдачи от горячей вертикальной стенки к окружающему воздуху [2]

$$\alpha_2 = 1,98 \sqrt[4]{t_2 - t_g}. \quad (5)$$

Плотность теплового потока (теплонпряженность)

$$q = \frac{Q}{F} = K \Delta t. \quad (6)$$

Тепловой поток от конденсирующегося пара

$$q_k = \alpha_1(t_v - t_1). \quad (7)$$

Тепловой поток через стенку колбы

$$q_c = \frac{\lambda_{cm}}{\delta_{cm}}(t_1 - t_2). \quad (8)$$

Поток тепла, идущий от наружной стенки к окружающему воздуху

$$q_g = \alpha_2(t_2 - t_g). \quad (9)$$

Пренебрегая величиной тепла, идущего на нагрев стенки колбы $\left(c_{cm} m_{cm} \frac{dt}{d\tau} \approx 0\right)$, исходя из теплового баланса можно получить тождество:

$$q_k \approx q_{cm} \approx q_g = q. \quad (10)$$

Подставив уравнение (5) в (9), получим

$$q_g = 1,98(t_2 - t_g)^{1,25}. \quad (11)$$

Данная формула справедлива при относительно невысоких температурах. При повышенных температурах имеет место наряду со свободной конвекцией и тепловое излучение. Тогда формулу (10) можно переписать следующим образом:

$$q_k \approx q_{cm} \approx (q_g + q_\lambda) = q. \quad (12)$$

Таким образом, температуру наружной стенки определим по показаниям пирометра (тепловизора).

$$q_\lambda = 5,7\varepsilon_\lambda \left[\left(\frac{t+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_g+273}{100} \right)^4 \right]. \quad (13)$$

где ε_λ – коэффициент излучения. Для стекла $\varepsilon_\lambda = 0,937$ [2].

Тогда, преобразовав формулу (8), определим температуру внутренней стенки колбы:

$$t_1 = \frac{\lambda_{cm}}{\delta_{cm}} q + t_2. \quad (14)$$

Теплофизические свойства углеводородного конденсата в первом приближении определим при температуре внутренней стенки колбы. При величине

$$\Delta t_k = \Delta t_1 = (t_v - t_1), \quad (15)$$

составляющей более 30...40 °С, расчет можно уточнить.

Из формулы в [3–4] для расчета характеризующего фактора углеводородов

$$K_x = \frac{1,216\sqrt[3]{t_k + 273}}{\rho_{15}^{15}}$$

найдем относительную плотность, приняв для углеводородов парафинового ряда $K_x = 12$:

$$\rho_{15}^{15} = \frac{1,216\sqrt[3]{t_k + 273}}{K_x}, \quad (16)$$

$$\rho_4^{20} = \rho_{15}^{15} - 0,0093. \quad (17)$$

Плотность узких нефтяных фракций (УНФ) при температуре кипения определим по формуле Мановяна [5]:

$$\rho_t = 1000\rho_4^{20} - \frac{0,058}{\rho_4^{20}}(t_k - 20) - \frac{t - 1200 \cdot (\rho_4^{20} - 0,68)}{1000}(t_k - 20). \quad (18)$$

Коэффициент теплопроводности конденсата вычислим по формуле Крэга [3]:

$$\lambda_k = \frac{0,1175}{\rho_{15}^{15}}(1,1472 - 0,00054(t_k + 273)). \quad (19)$$

Удельную теплоту конденсации (испарения) УНФ вычислим по уравнению Уэйра – Иттона [3], Дж/кг:

$$r_k = \left[\frac{993,5 - 6661,5\rho_{15}^{15} - (t_k + 273)(1,733 - 1,813\rho_{15}^{15})}{-(t_k + 273)^2(0,00059\rho_{15}^{15} - 0,00015)} \right] \cdot 10^3. \quad (20)$$

Коэффициент динамической вязкости конденсата найдем по приближенной формуле [3], Па·с:

$$\mu_t = \frac{0,008(\rho_t)^{0,5}}{1000}. \quad (21)$$

Преобразовав уравнения (3), (7) и (13), получим

$$q_k = 2,04 \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 \lambda_k^3}{\mu_k} \cdot \frac{r_k}{H}} \cdot \Delta t_1^{3/4}, \quad (22)$$

отсюда

$$\Delta t_1 = \left[\frac{q}{2,04 \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 \lambda_k^3}{\mu_k} \cdot \frac{r_k}{H}}} \right]^{4/3}. \quad (23)$$

Вероятная температура углеводородных паров

$$t_v = \Delta t_1 + t_1. \quad (24)$$

Для практической реализации в случае перегонки сложных смесей нефтепродуктов, в которых обязательно требуется информация о вязкостно-температурной зависимости, использование формулы (23) затруднительно. Поэтому целесообразно воспользоваться экспериментальными значениями коэффициента теплоотдачи. На основе обработки экспериментальных данных были получены численные значения коэффициентов теплоотдачи конденсации углеводородных паров на стенке горловины колбы в точках S2 и S3 (см. рис. 2), которые приблизительно составляют:

$$\alpha_{S2} = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\alpha_{S3} = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Представив численные значения α_{S2} и α_{S3} как соотношение, получим

$$\varepsilon_S = \frac{\alpha_{S3}}{\alpha_{S2}} = 0,7, \quad (25)$$

отсюда видно, как влияет переохлажденный конденсат на значение коэффициентов теплоотдачи в различных точках горловины колбы. К тому же в зоне пароводной трубки может присутствовать незначительное количество воздуха, которое приводит к снижению коэффициента теплоотдачи при конденсации паров.

Рассчитаем значения коэффициентов теплопередачи в точках S2 и S3.

В точке S1 коэффициент теплопередачи определяется с учетом того, что $1/\alpha_{S1} \ll \delta/\lambda_{cm.}$:

$$\begin{cases} K_{S1} = \frac{1}{(\delta/\lambda_{cm.})}, \\ K_{S2} = \frac{1}{1/\alpha_{S2} + (\delta/\lambda_{cm.})}, \\ K_{S3} = \frac{1}{1/\alpha_{S3} + (\delta/\lambda_{cm.})}. \end{cases} \quad (26)$$

Численные значения коэффициентов теплопередачи в точках S1, S2 и S3 составляют:

$$K_{S1} = 102 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad K_{S2} = 128 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad K_{S3} = 330 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Подставив значения коэффициентов теплопередачи, предварительно преобразовав формулу (6), можно вычислить вероятную температуру испытуемого продукта в конкретных точках колбы:

$$t_{vs} = \frac{q}{K_s} + t_s. \quad (27)$$

На основании изложенной выше методики с помощью программного пакета MathCAD проведем математическое моделирование процесса, происходящего в колбе. На рисунке 5 представлена зависимость теплового потока q_t , проходящего через стенку колбы в контрольной точке по температурным показаниям пирометра и его составляющих. График позволяет численно оценить значения тепловых потоков через стенку колбы в контрольной точке.

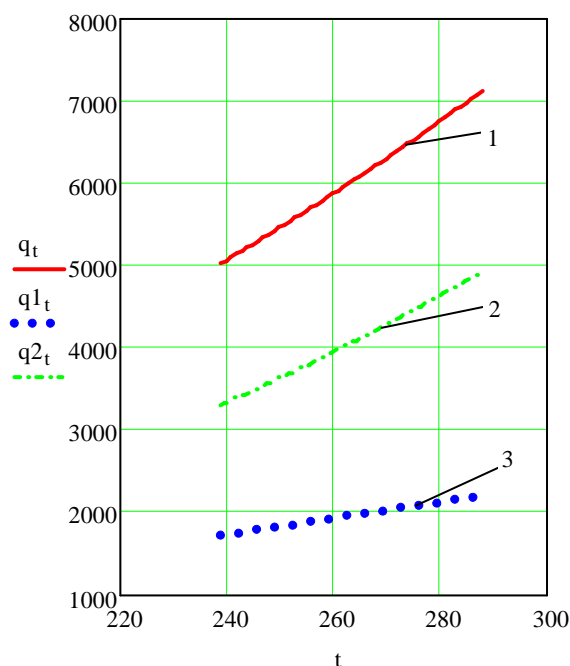


Рисунок 5. – Зависимость теплового потока q_t , проходящего через стенку колбы в контрольной точке по температурным показаниям пирометра q_t (линия 1) и его составляющих: $q1_t$ – конвективная (точечная линия 3) и $q2_t$ – лучистая (пунктирная линия 2)

Как видно из рисунка 5, составляющая потеря тепла выше излучением, чем конвекцией.

На основе формулы (27) построим зависимости температур продукта в колбе в различных точках от показаний пирометра (рис. 6). По оси абсцисс графика – значения пирометра; по оси ординат – значения температур продукта в колбе. Прямые отображают зависимости этих температур в соответствующих контрольных точках (S1, S2 и S3). Из графиков, изображенных на рисунке 6, видно, что пунктирные прямые пересекают контрольную линию (1), соответствующую температуре паров в колбе (288 °C), в точках по оси абсцисс, близких к своим экспериментальным значениям.

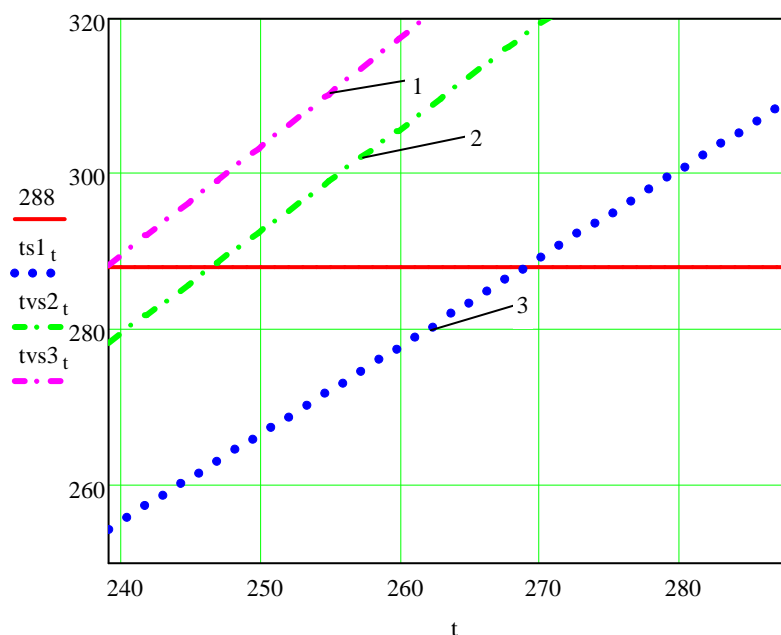


Рисунок 6. – Зависимости вероятных температур нефтяных фракций от показаний пирометра в контрольных точках колбы

Заключение. Полученные расчетные значения температур соответствуют экспериментальным значениям температуры 288 °С. Следовательно, результаты расчетов позволяют говорить о том, что данную математическую модель можно использовать для прогнозирования температур испытуемого нефтепродукта по значениям пирометра. Таким образом, согласно зависимостям (рис. 6), по показаниям пирометра можно определить вероятную температуру паров в колбе (распределение температур). Представленная методика позволяет скорректировать программу управления нагревом проб испытуемого вещества в автоматических анализаторах фракционного состава светлых нефтепродуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко, В.П. Теплопередача : учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд. пер. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
2. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. – М.-Л. : Химия, 1968. – Т. V. – 963 с.
3. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки : справочник / Г.Г. Рабинович [и др.] ; под ред. Е.Н. Судакова. – М. : Химия, 1979. – 568 с.
4. Александров, И.А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке / И.А. Александров. – М. : Химия, 1979. – 361 с.
5. Мановян, А.К. Лабораторная перегонка и ректификация нефтяных смесей / А.К. Мановян, Д.А. Хачатурова, В.В. Лозин. – М. : Химия, 1984. – 240 с.

Поступила 28.12.2016

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE PROBABILITY OF VAPOR TEMPERATURES BY PYROMETRIC METHOD

A. SPIRIDONOV, E. SAFRONOVA, V. URVATSEV

The paper considers the possibility of calculating the temperature of vapor boiling oil in the flask standardized apparatus simple gradual distillation pyrometric method that allows to adjust the heating test of petroleum products and to provide clearer compliance standard procedures by the time of the fall of the first drop (beginning of boiling) automatically, without the need for manual adjustment of the heating operator. To this end, developed a mathematical model of heat transfer between the pairs of petroleum and the environment. The experiment and the experimental data verification has developed heat transfer model.

Keywords: analyzers, fractional composition, temperature, thermometer, heat transfer.