

## ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

<sup>1</sup>Земенков Ю.Д., <sup>2</sup>Шалай В.В., <sup>1</sup>Земенкова М.Ю., <sup>2</sup>Щерба В.Е.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: muzemenkova@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия, e-mail: info@omgtu.ru

---

В рамках разработки системы мониторинга надежности и безопасности при транспорте углеводородов разработаны методики оценки теплофизических свойств углеводородов для различных эксплуатационных условий. Авторами проведены исследования и создан алгоритмический и математический комплекс для экспертной системы оценки надежности при транспорте и хранении углеводородов. В качестве примера показана методика по расчету теплофизических свойств газовых конденсатов по результатам проведенных экспериментальных исследований. Исследования проведены с применением теории многофакторных экспериментов и регрессионно-корреляционного анализа. Получены расчетные зависимости для определения давления насыщенных паров испаряющейся нефти и стабильного конденсата на требуемую температуру при различных уровнях потерь от испарения. Результаты исследований могут быть использованы для оценки теплофизических свойств углеводородов при мониторинге технологических процессов.

---

Ключевые слова: газовый конденсат, углеводород, теплофизические свойства, эксплуатационные свойства, оперативный мониторинг, трубопроводный транспорт

## ASSESSMENT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF HYDROCARBONS WHEN MONITORING SAFETY OF TECHNOLOGY PROCESSES

<sup>1</sup>Zemenkov Y.D., <sup>2</sup>Shalay V.V., <sup>1</sup>Zemenkova M.Y., <sup>2</sup>Shcherba V.E.

<sup>1</sup>FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: muzemenkova@mail.ru

<sup>2</sup>FGBO of higher education "Omsk state technical university", Omsk, Russia, e-mail: info@omgtu.ru

---

As part of the development of a monitoring system reliability and security in the transport of hydrocarbons developed methodology for assessing the thermal properties of hydrocarbons for different operating conditions. The authors studied and developed algorithmic and mathematical expert system for evaluating the reliability of the system during the transport and storage of hydrocarbons. As an example of the method for the calculation of thermal properties of gas condensates on the results of experimental studies. The study was conducted with the use of the theory of multifactorial experiments and regression-correlation analysis. The dependences for the vapor pressure of the evaporating oil and stable gas condensate to the desired temperature at different levels of evaporation losses. The research results can be used to evaluate thermal properties of hydrocarbons in monitoring industrial processes.

---

Keywords: gas condensate, hydrocarbon, heatphysical properties, operational properties, expeditious monitoring, pipeline transport

На практике на различных этапах транспорта конденсатов, товарных нефтей, и продуктов их переработки подлежат обязательному контролю свойства, характеризующиеся уровнем качества. Количественную оценку одного или нескольких свойств продукции характеризуют показателем качества. Например, качество нефти, удовлетворяющее требованиям НПЗ, должно соответствовать техническим условиям. Оптимальным уровнем показателя, как правило, считается такой, при котором достигается наиболее полное удовлетворение требований, как правило, только потребителя и оказывается недостаточным в эксплуатационных условиях и может привести к ошибочным решениям даже на стадии проектирования систем.

Из анализа опубликованной литературы следует, что недостаточные знания свойств углеводородных жидкостей приводит к тактическим ошибкам при ликвидации нефтяного загрязнения, например, попавшей в воду в результате утечки или залпового сброса. Нередко, ошибочно отождествляя свойства нефтяного пятна на поверхности воды со свойствами чистого продукта, такое пятно пытаются поджечь. Следует учитывать, что углеводороды активно взаимодействуют с водой и воздухом, образуя эмульсию с трудно прогнозируемыми характеристиками. Поскольку сбор нефти с поверхности воды почти всегда осуществляется с помощью технических средств, необходимо также учитывать возможное утяжеление и увеличение вязкости, наличие растворенного газа, а также фракций с температурой вспышки паров менее 60°C, недопустимых с точки зрения пожарной безопасности. Необходимость знания свойств особенно подчеркивается в условиях эксплуатации различного оборудования. Так, например, при утечках нефти в помещениях испарившиеся углеводороды с относительной плотностью  $\rho_{отн} < 1$  распространяются прежде всего в верхней зоне помещения, а пары с  $\rho_{отн} > 1$  (например, пропана, пентана и гексана) попадают в каналы, подвалы и т. п.

При попадании механических примесей, испарении, растворении в воде, эмульгировании, окислении при воздействии солнечной радиации изменяются масса и свойства нефти. Важный фактор, который следует учитывать при очистке водных поверхностей - плотность нефти. При плотности жидкого углеводорода, приближающейся к 900 кг/м<sup>3</sup>, возникает угроза ее осаждения на дно. Это явление особо опасно и наблюдается при уменьшении плотности воды вследствие понижения ее температуры с 4 до 0 °С. Нефть может всплыть на поверхность даже через большой промежуток времени при повышении ее температуры и соответствующем изменении свойств.

Определение плотности нефти и нефтепродуктов весьма облегчает возможные расчеты, связанные с определением их массы. Учет количества нефти и нефтепродуктов в объемных единицах вызывает некоторые неудобства, т. к. объем жидкости меняется с изменением температуры. Поэтому, зная объем и плотность, при приеме, отпуске и учете нефти и нефтепродуктов можно выражать их количество в массовых единицах, не зависящих от температуры.

Анализируя изменение физико-химических, теплофизических и опасных свойств чистых углеводородов, можно заметить, что даже у веществ, имеющих одну химическую формулу, ряд показателей существенно отличается по величине. Физические свойства нефти и конденсата зависят не только от преобладания в них отдельных углеводородов, но и различных их групп, содержание которых существенно меняется при испарении в условиях аварийного растечения. Таким образом, только достоверная и полная информация об

основных свойствах углеводородов и их смесей позволяет выбрать и разработать наиболее целесообразный способ хранения, учет, технологию их транспортировки и стратегию производства аварийно-восстановительных работ.

По прогнозам Минпромэнерго [4], объемы добычи газового конденсата к 2020 году увеличатся до 26-32 млн.т./год и к 2025 до 31-37 млн.т./год. Планируемое увеличение объемов добычи конденсата обоснованно вводом в разработку глубокозалегающих залежей новых месторождений.

Перспективными регионами в настоящее время являются новые месторождения Надым-Пур-Тазовского региона (до 26-32 млн.т./год к 2020 году), полуострова Ямал, шельф Баренцева моря, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке (до 5,3-5,5 млн. т/год к 2030 году).

Авторами разработана методика, позволяющая проводить оперативную оценку свойств газового конденсата при изменении эксплуатационных условий.

К настоящему времени значительное количество исследовательских работ ведущих НИИ и организаций (Газпром ВНИИГАЗ, УГНТУ, ИПТЭР, ТюмГНГУ, РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина др.) посвящено изучению давления насыщенных паров жидких углеводородов/ Разработан ряд экспериментальных способов и аналитических методов определения  $p_s$  различных нефтепродуктов и нефтей применительно к условиям их хранения.

Высокий научный уровень проведенных исследований позволяет констатировать, что экспериментальные методы, к сожалению, несовершенны, длительны, трудоемки, имеют низкую воспроизводимость опытов. Как следует из анализа публикаций для определения давления  $p_s$  паров индивидуальных углеводородов составлены номограммы, таблицы, а аналитические методы расчета вполне приемлемы и оправданы, вследствие удовлетворительной погрешности.

В результате исследований газовых стабильных и деэтанализированных конденсатов (СК и ДК) проведенных авторами [1-10] было установлено, что для расчета давления  $p_s$  представляется возможным использовать следующую зависимость

$$p_s = k_s \sum_{i=1}^n x_i \times 10^{A_i - B_i(C_i + T_i)^{-1}}, \quad (1)$$

где  $p_s$  - давление насыщенных паров при температуре  $t=38$  0С;

$x_i$  – концентрация углеводорода в конденсате;  $k_s$  – коэффициент, характеризующий отклонение формулы от закона аддитивности;  $T$  - температура, К;  $A_i, B_i, C_i$  – коэффициенты Антуана, приведенные в табл.1. Для исследованных Уренгойских стабильных конденсатов  $k_s = 1,3$ , для деэтанализированных  $k_s = 1,15$ .

К недостаткам полученной формулы следует отнести необходимость предварительного определения углеводородного состава жидкости, хотя в настоящее время это уже не является проблемой. Тем более, что, как правило, оказывается вполне достаточным априори иметь информацию только о содержании углеводородов до C7.

Таблица 1 - Значения коэффициентов Антуана

Углеводороды	Коэффициенты			Температура	
	A	B	C	от T	до T
C2H6	9,5784	1030,628	39,083	244	305
C3H8	9,4337	1048,900	5,610	232	301
n-C4H8	9,1181	1030,340	-22,190	272	348
i-C4H8	9,3117	1120,165	-1,297	252	407
n-C5H10	8,9995	1075,820	-39,791	244	393
i-C5H10	8,9345	1020,010	-40,053	244	737
C6H10	9,0026	1171,530	-48,784	214	423

Результаты исследований  $p_s$  стабильных и деэтанализированных конденсатов по экспериментальному методу Рейда, представленные на рис. 1, указывают на значительный разброс данных, особенно для деэтанализированного конденсата, что легко объясняется различным составом в конденсатах легких углеводородов и проблемами, связанными с отбором адекватных проб и их хранении. При известной концентрации легких углеводородов в конденсатах экспериментальные значения  $p_s$  удовлетворительно аппроксимируются следующей зависимостью:

$$p_s = k_s \sum_{i=1}^n p_{si} x_i, \quad (2)$$

где  $p_{si}$ ,  $x_i$  – парциальное давление и концентрация  $i$ -го компонента.

Существенное отклонение экспериментальных данных от среднего значения  $p_s$  для смеси ДК с ШФЛУ (широкая фракция легких углеводородов) подтверждает превалирующее влияние легких компонентов на исследуемый параметр и свидетельствует об условности использования его в расчетах. Расчетный коэффициент парной корреляции для исследуемой зависимости  $p_s = f(t)$  составляет 0,52 и не позволяет аппроксимировать полученные экспериментальные данные с достаточной погрешностью.

На основании регрессионного анализа данных, полученных для условий испарения головных фракций деэтанализированного конденсата, оценочный пересчет можно провести по следующей формуле

$$\ln p_{s\sigma} = \ln p_{s0} - 2,24(\sigma/\Phi), \quad (3)$$

где  $p_{s0}$  и  $p_{s\sigma}$  - давление насыщенных паров исходного продукта и при величине потерь от испарения  $\sigma$ , соответственно, Па.

Для стабильного конденсата такая зависимость имеет аналогичный вид, хотя влияние потерь легких фракций менее значительно:

$$\ln p_{s\sigma} = \ln p_{s0} - 0,83 (\sigma/\Phi). \quad (4)$$

для проведения экспертных расчетов выбросов конденсатов при условии наличия адекватной априорной информации об изменении  $p_S$  могут быть использованы, например, следующие формулы:

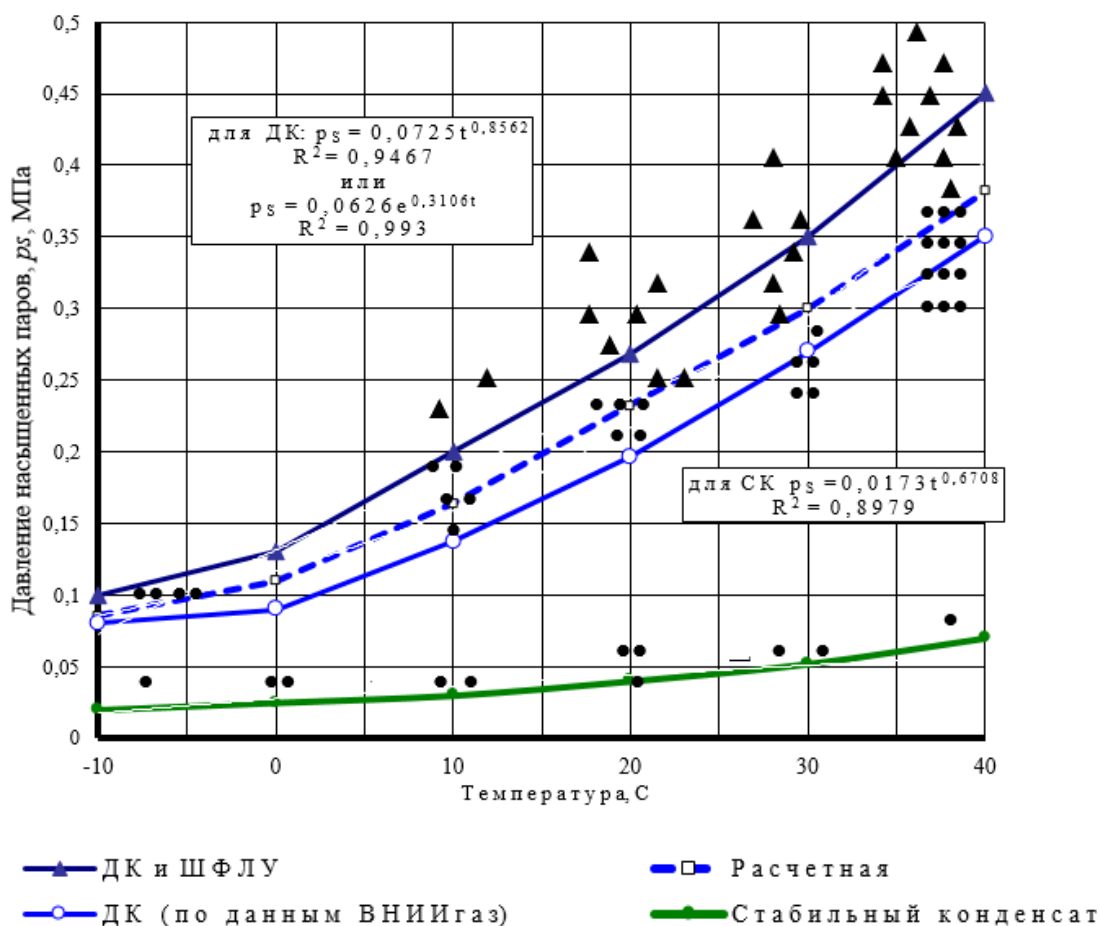
$$\begin{aligned} \text{для } DK_{\sigma} &= 1,205\Phi \ln(p_{s0}/p_{s\sigma}); \\ \text{для } CK_{\sigma} &= 0,446\Phi \ln(p_{s0}/p_{s\sigma}). \end{aligned} \quad (5)$$

При определении давления насыщенных паров нефтей также априори следует знать зависимость  $p_S = f(\sigma)$ , по которой необходимо определить свободный коэффициент в формуле (3) для каждой нефти.

Пересчет давления  $p_S$  конденсата на требуемую температуру представляется возможным использовать уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned} \log p_S &= 8,59 - 981 T^{-1}, \quad [\text{Па}] \\ \text{и} \quad \log p_S &= 2,55 - 978 T^{-1}, \quad [\text{МПа}] \end{aligned} \quad (6)$$

Корреляционный анализ показал, что для всех полученных выше зависимостей (1) ÷ (6) расчетные значения критерия Фишера значительно превышают табличные (с доверительной вероятностью  $P_{\alpha} = 0,95$ ), т.е. предложенные математические модели адекватно описывают исследованные фазовые переходы.



▲ - экспериментальные значения для смеси ДК+ШФЛУ

Рис.1. Влияние температуры на величину давления насыщенных паров конденсатов

На основе проведенных экспериментальных исследований и применения теории многофакторных экспериментов и регрессионно-корреляционного анализа получены расчетные зависимости для определения давления насыщенных паров испаряющейся нефти и стабильного конденсата.

Комплекс установленных закономерностей и расчетных аналитических выражений позволяет оценить степень возможных изменений свойств жидких углеводородных смесей с погрешностью, соизмеримой с точностью прямых экспериментальных определений. Следует отметить высокие значения коэффициентов множественной корреляции  $R_a = (0,85 \div 0,98)$ . Разработанные для практических расчетов математические модели адекватно описывают эксперименты по критерию Фишера с доверительной вероятностью  $P_a = 0,95 \div 0,97$ .

Установлено и экспериментально доказано, что при известной концентрации углеводородов в стабильных и деэтанализованных конденсатах фактические значения  $p_s$  удовлетворительно аппроксимируются аналитической зависимостью с использованием коэффициентов Антуана и коэффициентов, характеризующих отклонение математической

модели от закона аддитивности. получены уравнения для пересчета давления  $p_s$  конденсатов на требуемую температуру при различных уровнях потерь от испарения.

### Список литературы

1. Антипьев В.Н., Неволин А.П., Земенков Ю.Д. Работа промежуточных насосных станций при перекачке газонасыщенных нефтей//Нефтяное хозяйство.-1981.-№10.-С.46-48.
2. Аспекты технологической надежности и экономической эффективности эксплуатации подземных хранилищ природного газа Западной Сибири: монография/Шиповалов А.Н., Земенков Ю.Д., Торопов С.Ю., Подорожников С.Ю., Земенкова М.Ю., Тырылгин И.В., Павлов В.П.-Тюмень: ТюмГНГУ, 2012 -344 с.
3. Вакулин А.А., Шабаров А.Б. Диагностика теплофизических параметров в нефтегазовых технологиях. Новосибирск: Наука, 1998.-249с.
4. Воронин К.С., Земенков Ю.Д. Динамические предвестники нарушения геометрической формы газопровода//Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. -2012. - № 3. - С. 70-72.
5. Генеральная схема развития газовой отрасли России на период до 2030 года, разработанная в рамках комплекса мероприятий по развитию системы трубопроводного транспорта углеводородного сырья в Российской Федерации (утв. Минпромэнерго 10.09.2004, подг. по поручению Президента Российской Федерации от 25.02.2004 № Пр-313.)<http://www.energyland.info/library-show-2928> 25.03.2015
6. Дудин С. М. Моделирование фазового состава газоконденсата в трубопроводах./Дудин С. М., Земенков Ю. Д., Шабаров А. Б., Саранчин Н. В.//Известия вузов. Нефть и газ. -Тюмень, - 2010. -№6.
7. Техническая и параметрическая диагностика в трубопроводных системах/ Антипьев В.Н., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б. и др. Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. -Тюмень: изд-во «Вектор Бук», 2002, 432с.
8. Торопов С.Ю., Торопов В.С. Методика предсказания надежности нефтегазотранспортного оборудования//Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1997. -№ 6. -С. 135.
9. Шабаров А.Б., Ибрагимов А.А., Подорожников С.Ю. и др. Экспериментальная установка для исследования влияния напряжений на скорость коррозии трубных сталей.//Сб. тр. Всероссийской. науч.-практич. конф. «Проблемы функционирования систем транспорта». - Тюмень: ТюмГНГУ. -2012.-С. 394 -395.

10.Yu.D. Zemenkov, V.V. Shalay, M.Yu. Zemenkova. Immediate Analyses and Calculation of Saturated Steam Pressure of Gas Condensates for Transportation Conditions. Procedia Engineering, Volume 113 (2015) Pages 254-258.

**Рецензенты:**

Торопов С.Ю., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень;

Чекардовский М.Н., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень.