

К вопросу смешения углеводородного конденсата с товарной нефтью (постановка задачи)

И.Ю. Хасанов (Салават, Россия)

npc-sherik@mail.ru

д.т.н., ООО НПЦ «Шэрык»

А.Г. Шефер (Астана, Казахстан)

филиал «Лукойл Оверсиз Сервис Лтд»

У.Р. Ильясов (Ишимбай, Россия)

к. ф.-м. н., Уфимский государственный авиационный технический университет, филиал

М.Ф. Мугафаров

к.ф.-м. н., Уфимский государственный авиационный технический университет, филиал

С.М. Мухаметшин

к. ф.-м. н., Уфимский государственный авиационный технический университет, филиал

Предложена математическая модель смешения товарной нефти и жидкой части широкой фракции легких углеводородов в потоке. Выписана система уравнений, описывающих этот процесс, приведены условия их решения. Дана оценка протяженности зоны полного растворения газовой фазы в потоке.

Материалы и методы

Компьютерное моделирование процессов смешения гетерофазных систем, опытно-промышленные испытания на установках подготовки нефти и газа месторождения Каракудук.

Ключевые слова

Математическое моделирование, смешение, товарная нефть, широкая фракция легких углеводородов, газожидкостный поток.

To the issue of hydrocarbon condensate intermixture with commodity oil (problem definition)

Authors

I.Yu. Khasanov

D.E.S., JSC NPTs «Sheryk», Salavat, RB

A.G. Shefer

Lukoil Overseas Service Ltd. branch

Как известно, широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ) является продуктом подготовки попутных нефтяных газов (ПНГ). В последнее время нефтяные компании принимают меры по более полной, вплоть до 95% утилизации добытых ПНГ, что приведет к появлению переизбытка ШФЛУ, подлежащей рациональной реализации.

В этих условиях предложена технология разделения ШФЛУ на жидкую и газовые фракции [1]. В данной части работы рассматривается технология возврата жидкой части ШФЛУ в товарную нефть путем закачивания ее в поток через дроссельный смеситель с обеспечением условий получения качественной смеси на основе математического моделирования процесса.

Задачей математического моделирования ставилась визуализация структуры потока, определение протяженности зоны смешения нефти и жидкой фазы ШФЛУ по следующим критериям:

- однородность поля концентрации и температуры полученной смеси;
- путь полного растворения в нефти, образовавшейся в процессе дросселирования газовой фазы.

Модель смесителя представляет собой отрезок трубы по которой течет нефть с заданными массовым расходом и температурой. В поток несущей жидкости вводится жидкая часть ШФЛУ через Г — образную трубу с перфорированной частью, соосно расположенной нефтяной трубе. После смесителя диаметр трубы может варьироваться. Расчетная схема смешения и смесителя показана на рис.1

Давление в потоке нефти меньше давления насыщения конденсата, подаваемого в смеситель, что приводит к возникновению дроссельного эффекта и частичному разгазированию последнего. В результате через перфорации смесителя в поток нефти поступает газожидкостная смесь. Температура потока нефти и давление в трубопроводе известны. Значения расходов нефти и конденсата могут меняться в заданных пределах. Как отмечалось выше, трубопровод может иметь различные диаметры, следовательно, скорость потока в трубопроводе может значительно отличаться, а это влияет на протяженность зоны полного перемешивания и растворения.

Кроме того, на качество смеси влияет давление перед смесителем. Оно выбирается с учетом гидравлических потерь потока до смесителя, потерь давления на самом смесителе и в потоке нефти. Каждому значению давления соответствует своя температура дросселирования, а следовательно, расходы жидкой и паровой фаз. Диаметр перфораций (отверстий) на смесителе также влияет на качество смешения, т.к. от него зависит скорость впрыска и картина перемешивания в начальный момент времени.

Данные по температуре дросселирования газоконденсата и расходам образующегося пара и жидкости получены с использованием моделирующей системы HYSYS. Полная картина перемешивания в потоке была изучена построением математической модели процесса и численным исследованием модели.

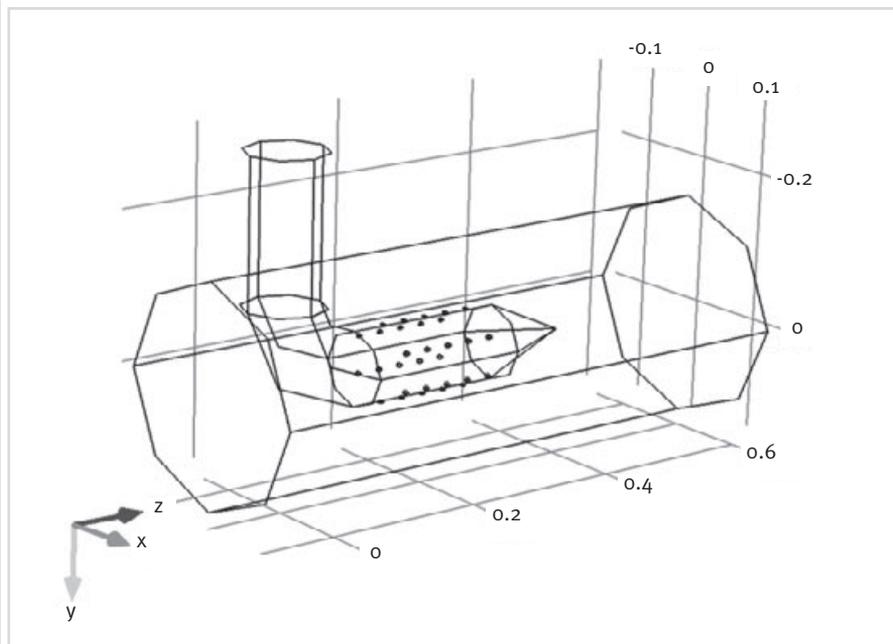


Рис.1 — Расчетная схема дроссельного смесителя

U.R. Ilyasov

Ph.D., Ufa State Aviation Technical University,
Ishimbay branch, RB

Mugafarov M. F.

Ph.D., Ufa State Aviation Technical University,
Ishimbay branch, RB

Mukhametshin S. M.

Ph.D., Ufa State Aviation Technical University,
Ishimbay branch, RB

Abstracts

A mathematical model of commodity oil and wide fraction light of hydrocarbons liquid part intermixture in a stream is offered. An equations system describing this process is proposed, conditions of their solution are presented. An assessment of gas phase complete dissolution zone extent in the stream is presented.

Materials and methods

Computer modeling of heterogeneous systems intermixture processes, results of pilot testing at Karakuduk fields oil and gas treatment facilities.

Results

Experimental-industrial tests of the developed technology and equipment for compounding of NGL and commodity oil flow in a pipeline are carried out. The technology and the equipment are implemented on the Karakuduk field, Republic of Kazakhstan.

Conclusions

Presented is a mathematical model of commodity oil and condensate intermixture in a throttle mixer, for which an equations system describing movement of gas phase mix in a pipe is written down. Analytical assessment of gas phase complete dissolution zone extent in the carrying stream is obtained.

Keywords

Mathematical modeling, intermixture, commodity oil, wide fraction light of hydrocarbons, gas-liquid stream.

References

- Gurzhiy S.L., Shefer A.G., Rogozin V.I., Khasanov I.Yu. On rational technology of hydrocarbon condensate recovery at Karakuduk field //XIX International Specialized Exhibition «Gas. Oil. Technologies - 2011» Ufa, May 24-27, 2011. Forum materials. Safety and reliability assurance problems and methods of oil, oil products and gas transportation systems. Pages 139-142.
- Nigmatullin R.I. Dynamics of polyphase media. Part 1, 2 – Moscow: Nauka. Main office of physico-mathematical literature, 1987 – 464 pages.
- Kutateladze S.S. Nakoryakov V.E. Heat-mass-exchange and waves in liquid-gas systems. – Novosibirsk: Nauka, 1984.
- Vitkov G.A., Kholpanov L.P., Sherstnev S.N. Hydraulic resistance and heat-mass-exchange. – Moscow: Nauka, 1994. 288 pages.
- <http://www.openfoam.com>
- Nikitin K.D. Nonlinear method of final volumes for polyphase filtration problems // Mathematical modeling. 2010. Volume 22, No. 11. Pages 131-147.

Основные уравнения

Задача сводится к изучению динамики двухфазной газожидкостной смеси с температурными эффектами, где жидкая фаза состоит из двух компонент: несущей (товарная нефть) и инжектируемой (конденсат) фаз.

Введем среднюю плотность и вязкость смеси

$$\rho = \rho_{oil}\phi_{oil} + \rho_l\phi_l + \rho_g\phi_g \quad (1.1)$$

$$\mu = \mu_{oil}\phi_{oil} + \mu_l\phi_l + \mu_g\phi_g$$

где ϕ_i – массовая концентрация примеси в несущей фазе. Нижние индексы «oil», «l» и «g» обозначают «нефть», «жидкость–конденсат» и «газ», соответственно.

Оценим среднюю и максимальную скорость несущей фазы и скорость инжекции по известной формуле

$$v_i^{cp} = \frac{Q_{vi}}{S_i} \quad v_i^{max} = 2v_i^{cp} \quad (1.2)$$

где Q_{vi} – объемный расход, S_i – площадь сечения.

Для скорости впрыска примем $S_2 = n \cdot s$, где n – количество отверстий; s – площадь сечения одного отверстия. Ожидаемые значения скорости намного меньше скорости звука, тогда жидкость можно принять несжимаемой, а газ будем считать калорически совершенным. Числа Рейнольдса ($Re = \rho v r / \mu$) для основного потока и впрыска будут близки: $Re_{1,2} \approx 50000$, что соответствует развитой турбулентности.

Учитывая, малую массовую концентрацию паровой части $C = Q_{v2}^* / (Q_{v1}^* + Q_{v2}^*) = 0.01$ в трубе должен реализоваться пузырьковый или эмульсионный режим течения [2, 3].

Система уравнений, описывающая движение приведенной выше смеси состоит из уравнения импульсов, уравнений сохранения массы для всего потока и газовой фазы, а также уравнения энергии [2].

Уравнение движения (Навье-Стокса) запишем в виде:

$$\phi_l \rho_l \frac{\partial \vec{u}_l}{\partial t} + \phi_l \rho_l (\vec{u}_l \cdot \nabla) \vec{u}_l = \nabla \cdot \left[-pI + \phi_l (\mu_l + \mu_T) (\nabla \vec{u}_l + (\nabla \vec{u}_l)^T) - \frac{2}{3} \rho_l kI \right] + \phi_l \rho_l \vec{g} + \vec{F}_{st} \quad (1.3)$$

где ϕ_i – массовая концентрация жидкой части потока, \vec{u}_i – скорость, ρ_i – плотность, p – давление, I – единичный тензор, μ_l, μ_T – динамическая и турбулентная вязкости несущей жидкости соответственно, \vec{g} – вектор ускорения силы тяжести, \vec{F}_{st} – поверхностная сила, которая вычисляется как

$$\vec{F}_{st} = \nabla T$$

$$T = \sigma (E - \vec{n} \cdot \vec{n}^T) \delta$$

Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения, E – единичная матрица, \vec{n} – вектор нормали к поверхности раздела фаз, δ – дельта-функция Дирака.

Уравнения сохранения массы для жидкости и газовой фазы примут вид:

$$\rho_l \nabla \cdot \vec{u}_l = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial \phi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_g \rho_g \vec{u}_g) = -m_{gl} \quad (1.5)$$

где m_{gl} – интенсивность массопереноса из газа в жидкость.

Скорость газовой фазы будет складываться из скорости несущей жидкости и относительной скорости движения газового пузырька относительно потока, или скоростью проскальзывания \vec{u}_{slip} .

$$\vec{u}_g = \vec{u}_l + \vec{u}_{slip} - \mu_T \frac{\nabla \phi_g}{\rho_l \phi_g} \quad (1.6)$$

Уравнения для кинетической энергии пульсации скорости k и скорости диссипации энергии ε :

$$\rho_l \frac{\partial k}{\partial t} + \rho_l (\vec{u}_l \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho_l \varepsilon + s_k \quad (1.7)$$

$$\rho_l \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho_l (\vec{u}_l \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho_l \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 3} s_k \frac{\varepsilon}{k} \quad (1.8)$$

Турбулентная вязкость выражается через эти две величины. Здесь использовалась стандартная двухпараметрическая « k - ε » модель турбулентности со следующими константами: $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$. Для турбулентной вязкости, приведенного давления и внутреннего источника турбулентности, вызванного наличием пузырьков примем

$$\left[\frac{\nabla \vec{u}_l}{\nabla \vec{u}_l + (\nabla \vec{u}_l)^T} \right], s_k = -C_k \phi_g \nabla p \cdot \vec{u}_l$$

$$\mu_T = \rho_l C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad P_k = \mu_T \quad (1.9)$$

Уравнение притока тепла запишем в виде

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \vec{u}_l \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p \quad (1.10)$$

где Q , Q_{vh} , W_p – источники, связанные с фазовыми переходами, излучением и какими либо внутренними источниками.

Начальные и граничные условия зададим в следующем виде. Примем длину рассматриваемого участка трубы, равной 20 м, количество перфораций в смесителе, $n=35$. В начальный момент времени в основной трубе находится нефть, причем она покоится ($v_i=0$). В момент времени $t=0$ на входе основной трубы задаем скорость потока

v_1^{\max} на 35-ти отверстиях смесителя скоростью впрыска v_2^{\max} ; а также концентрациями жидкой и газовой фаз Φ_{lo} , Φ_{go} соответственно. На выходе из трубы задаем постоянное давление.

Для практики наибольший интерес представляет стационарный режим работы смесителя, но, учитывая существенные различия скорости впрыска конденсата от скорости основного потока, а также число Re_{10}^4 для потока вблизи смесителя, отыскать стационарное решение вышеприведенной системы уравнений не представляется возможным.

Совместное решение системы уравнений динамики жидкости, теплопроводности и пузырьковой жидкости представляет значительные трудности. В связи с этим задачу будем решать в два этапа:

- **первый этап:** задача перемешивания двух жидкостей (нефти и конденсата) с разными температурами, т.е. в основной трубе движется нефть при заданной температуре, а через отверстия смесителя подается вторая жидкость при температуре дросселирования;

- **второй этап:** задача растворения пузырьков газа в потоке нефти с растворенным в ней конденсатом.

Рассмотрим процесс растворения газовой фазы в потоке пузырьковой жидкости. Будем считать, что жидкость однородная, т.е. нефть полностью перемешалась с жидкой частью конденсата. Выберем сечение трубы на расстоянии 2 м от смесителя, на которое подается пузырьковая жидкость, с растворяющимся газом. Это позволяет значительно упростить задачу и свести ее к радиально-симметричной геометрии.

Приведем некоторые оценки для характерного расстояния, на котором происходит растворение газовой фазы в потоке нефти. Лимитирующее влияние на процесс растворения

газа будет оказывать самая легкая компонента, имеющая максимальную концентрацию, в нашем случае это пропан.

Рассмотрим одиночный пузырек из пропана, диаметром, равным диаметру отверстий смесителя, который растворится в несущей жидкости, и запишем уравнение баланса массы пузырька:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_g \right) = -4\pi a r_l D (k_s - k_0) Sh \quad (1.11)$$

где a — радиус пузырька, ρ_g — плотность газа или жидкости, D — коэффициент диффузии в нефти, k_s , k_0 — концентрации газовой фазы в тонком слое вблизи поверхности пузырька и в несущей жидкости, Sh — число Шервуда. Данное соотношение связывает скорость изменения массы пузырька (левая часть) со скоростью массообмена (правая часть).

Максимальную концентрацию газа, которая может реализоваться в несущей жидкости, положим равной отношению массовых расходов нефти и конденсата, в предположении, что весь газ растворился в нефти. Учитывая, что в пузырьке насыщенный пар, максимальная концентрация пропана в прилегающем к пузырьку слою жидкости близка к единице ($k_s \approx 1$). Число Шервуда вычислим, используя выражение [4].

$$Sh = 2 + 0.46 Re^{0.55} Pr^{0.33} \quad (1.12)$$

где $Re = \nu a r_l / \mu$ и $Pr = \mu c_p \lambda$ — числа Рейнольдса и Прандтля.

Тогда время полного растворения, будет:

$$\Delta t \approx \frac{2a_0^2 \rho_g}{r_l D Sh \Delta k} \quad (1.13)$$

Здесь a_0 — начальный радиус пузырька, зависящий от диаметра отверстий на смесителе, Δk — разность концентраций. Отсюда получим оценку сверху, т.е. при максимальном расходе нефти и максимальном расходе конденсата вычисляется число Шервуда и время полного растворения Δt .

Анализ картины течения реализован с использованием библиотек с открытым кодом OpenFOAM [5], путем численного решения системы уравнений пузырькового потока методом конечных элементов [6].

Расчеты показали, что при ожидаемых расходах нефти 140 т/ч и конденсата 1,6 т/ч, при диаметре нефтяной трубы 300 мм и Г-образной трубы диаметром 100 мм с 35 отверстиями диаметром 3 мм, при давлении впрыска 700 кПа в поток с давлением 400 кПа, протяженность полного растворения и смешения дает величину ~ 4 м.

Итоги

Проведены опытно-промышленные испытания разработанной технологии и оборудования для смешения жидкой части ШФЛУ в трубопроводе с потоком товарной нефти. Технология и оборудование внедрены на месторождении Каракандук, Республика Казахстан.

Выводы

Представлена математическая модель процесса смешения товарной нефти с конденсатом в дроссельном смесителе, для которой выписана система уравнений, описывающих движение парожидкостной смеси в трубе. Получена аналитическая оценка для протяженности зоны полного растворения газовой фазы в несущем потоке.

Список использованной литературы

1. Гуржий С.Л., Шефер А.Г., Рогозин В.И., Хасанов И.Ю. О рациональной технологии утилизации углеводородного конденсата на месторождении «Каракандук» // XIX международная специализированная выставка «Газ. Нефть. Технологии - 2011» Уфа 24-27 мая 2011 г. Материалы форума. Проблемы и методы обеспечения надежности
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1, 2 — М: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит, 1987 — 464 с.
3. Кутателадзе С.С. Накоряков В.Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984.
4. Витков Г.А., Холпанов Л.П., Шерстнев С.Н. Гидравлическое сопротивление и теплообмен. — М.: Наука, 1994. 288 с.
5. <http://www.openfoam.com/openfoam/>
6. Никитин К.Д. Нелинейный метод конечных объемов для задач многофазной фильтрации // Математическое моделирование. 2010. Т.22, № 11. С. 131-147.



Научно-производственный центр «Шэрык»

453266, Башкортостан, г. Салават-16, а/я 328
тел. (3476) 36-22-63, факс (3476) 36-19-74, E-mail: npc-sherik@mail.ru

Сфера деятельности — от научно обоснованной идеи до поставки оборудования и технологий в производство
Генеральный директор — доктор технических наук, заслуженный деятель науки РБ Хасанов Ильмер Юсупович

Направления деятельности. Прикладные научные исследования и разработка техники и технологий для нефтегазового комплекса, передача технологий и поставка техники нефтегазопромышленным компаниям применительно:
- охраны окружающей среды при сборе, подготовке и транспорте нефти и нефтепродуктов;
- строительства, реконструкции, эксплуатации и ремонта объектов нефтегазодобычи и трубопроводного транспорта;
- подготовки и хранения нефти и нефтепродуктов;

Деловые партнеры: ОАО «Газпром», ОАО «АК «Транснефть», ОАО «Салаватнефтемаш»; ЗАО «Белебеевский механический завод»; ЗАО «Уфагидромаш»; ОАО «МК «Витязь»; ТОО «Таза-Мунай «Актобе»; ТОО «Каракандукмунай» и др.

Потребители продукции: Российские и зарубежные нефтегазодобывающие и трубопроводные предприятия и организации.