

# Информационные технологии, автоматизация и управление в нефтегазовой отрасли

---

УДК 681.5

## СОВМЕСТНАЯ РАБОТА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА С МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ПОДГОТОВКИ СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ

CONJOINT WORK OF A FUZZY REGULATOR WITH A MATHEMATICAL  
MODEL OF PREPARATION OF EXTRA HEAVY CRUDE OIL

**К. Л. Горшкова, Л. Г. Тугашова**

K. L. Gorshkova, L. G. Tugashova

*Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск*

*Ключевые слова: сверхвязкая нефть; математическая модель; подготовка сверхвязкой нефти; нечеткий регулятор; транспортировка нефти*

*Key words: viscous oil; mathematical model; preparation of extra-viscous oil; fuzzy control; transportation of oil*

Анализ тенденций и перспектив развития технологии транспортировки потока сверхвязкой нефти с подогревом [1] показывает, что для снижения энергетических затрат на транспортировку необходимо оптимизировать параметры технологической схемы транспортировки, мощность и массогабаритные параметры системы подогрева потока нефти.

В климатических условиях России зависимость дисперсных свойств нефти от температуры определяющим образом влияет на эффективность ее транспортировки.

Вязкость нефти также зависит от внешних климатических условий, объемных соотношений высокосернистой (ВСН) и сверхвязкой нефти (СВН), расстояния транспортировки потока вязкой нефти, изоляции емкостей и трубопроводов и др. Все эти факторы в совокупности формируют неопределенность при математическом моделировании технологического процесса транспортировки.

В работах [1, 2] математическая модель объекта управления представлена алгебраическими, дифференциальными уравнениями и другими функциональными уравнениями, объединенными в общую систему, описывающую технологический процесс теплового воздействия на потоки высокосернистой, сверхвязкой и смешанной нефти.

В качестве критерия оптимизации вводится квадратичный функционал вектора состояния  $\bar{z}(t)$  и вектора управления  $U(t) = U(z(t))$  (обратная связь):

$$\begin{aligned} J_m &= \int_0^{\infty} (z(t)^T \cdot Q \cdot z(t) + U(t)^T \cdot R \cdot U(t)) dt = \\ &= \int_0^{\infty} (z(t)^T \cdot Q \cdot z(t) + U(z(t))^T \cdot R \cdot U(z(t))) dt, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q, R$  — весовые матрицы.

В пространстве состояний модель представлена в следующем виде:

$$\dot{z}(t) = A \cdot z(t) + B \cdot U(t), \quad y(t) = C \cdot z(t). \quad (2)$$

В условиях ограничений  $U(t) \in \Omega$  приводим (1) к виду

$$J_m = \int_0^{\infty} (z(t)^T \cdot Q \cdot z(t) + (-P \cdot z(t))^T \cdot R \cdot (-P \cdot z(t))) dt, \quad (3)$$

где  $U(z(t)) = -P \cdot z(t)$  — оптимальная обратная связь;  $P = -Q^{-1} \cdot B^T \cdot K^T$ ,  $K$  — положительно определенная симметричная матрица, являющаяся решением уравнения Риккати

$$K \cdot A + A^T \cdot K - K \cdot B \cdot B^{-1} \cdot B^T = -Q, \quad (4)$$

где  $A, B$  — матрицы параметров объекта и управления соответственно, получаемые из уравнений объекта или соответствующей ему передаточной функции вида.

В реальных производственных условиях технически не представляется возможным измерить все переменные состояния. Поэтому создается синтез системы управления, позволяющий восстановить недостающие координаты методами оценки переменных с помощью наблюдателя состояния, модель которого может быть представлена следующим уравнением:

$$\dot{\hat{z}}(t) = (A - G \cdot C) \cdot \hat{z}(t) + B \cdot U(t) + G \cdot y(t), \quad (5)$$

где  $G$  — матрица наблюдателя системы, которая определяется исходя из условия, что быстродействие наблюдателя в 2–4 раза выше, чем системы.

Разработанная схема управления температурой потока транспортируемой вязкой нефти (рис. 1) позволяет принять решение о регулировании температуры. При этом, согласно ГОСТ Р 51858–2002, динамическая вязкость должна находиться в пределах 1600 ÷ 5000 мПа·с при 20 °С, 200 ÷ 500 мПа·с при 40 °С и 70 ÷ 150 мПа·с при 70 °С. Поэтому температура вязкой нефти должна поддерживаться в границах от 10 до 20 °С. Интервалы выбираются в зависимости от температуры окружающей среды. На рисунке 1 обозначены —  $\theta_{ж3}, \theta_{ж4}$  — температуры вязкой нефти и на входе в установку подготовки нефти, град;  $\theta_{ж3,зад}$  — заданная температура для сверхвязкой нефти, град;  $\theta_{oc}$  — температура окружающей среды, град;  $\nu, \mu$  — кинематическая и динамическая вязкость (м<sup>2</sup>/с);  $\mu_{ж2}$  — динамическая вязкость сверхвязкой нефти (Па·с).

В работе [1] аналитические зависимости вязкости, приведенные в детерминированной модели, не позволяют напрямую вычислить ее изменение из-за существующих в этих параметрах неопределенностей, поэтому данная модель дополняется нечетким регулятором [3]. Повышение вязкости существенно влияет на мощность потребляемую насосом при транспортировке вязкой нефти. Решение основной задачи, а именно снижение энергетических задач [2], осуществляется путем применения моделей-идентификаторов состояния потоков в контуре системы управления установкой подогрева нефти при первичной подготовке сверхвязкой нефти для ее адаптации в условиях некоторой неопределенности на основе системно-структурированного математического моделирования процесса (см. рис. 1).

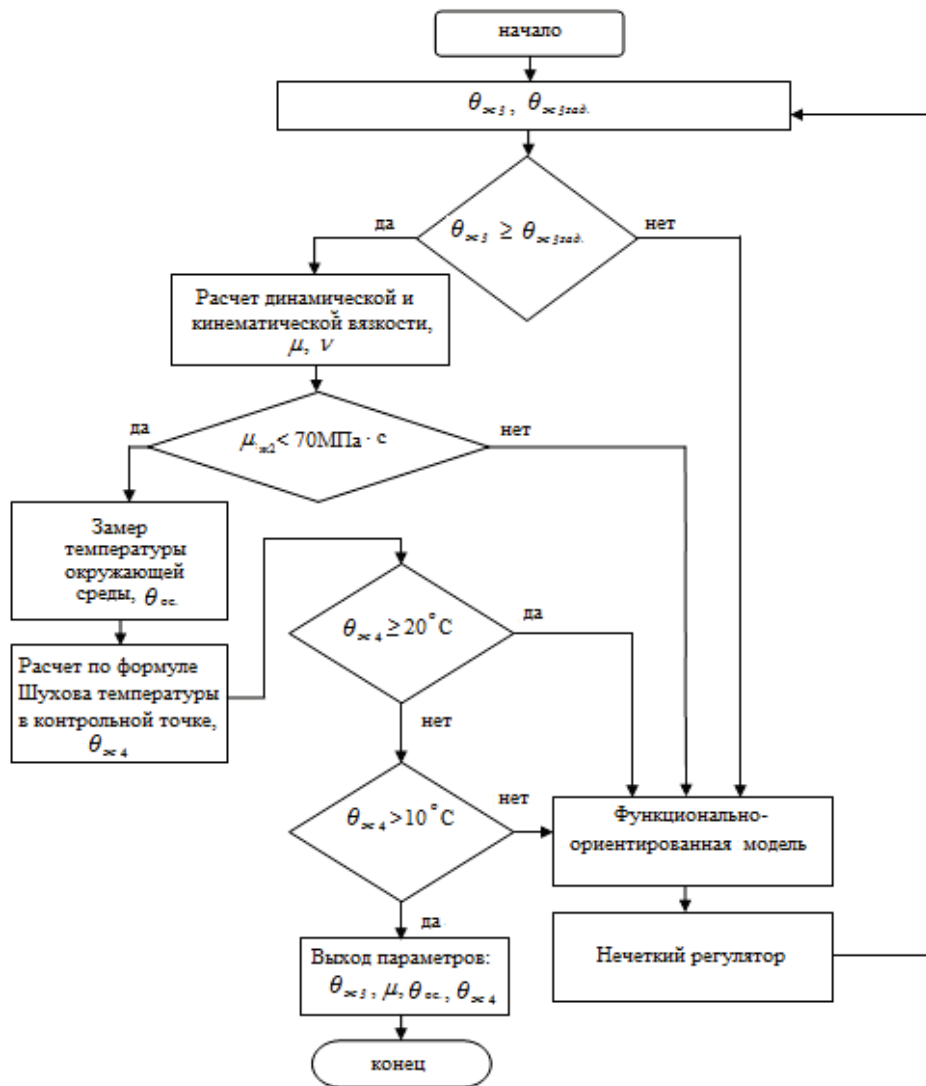


Рис. 1. Схема управления температурой потока вязкой нефти

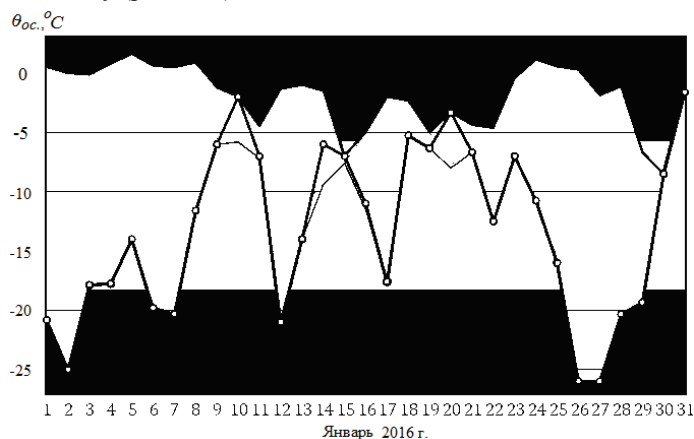
Для определения сходимости результатов математической модели с физической моделью по определению температуры в заданной точке было произведено моделирование в среде MATLAB с использованием результатов натуральных измерений, то есть расход сверхвязкой нефти —  $G_{ж2}$ , м<sup>3</sup>/ч, расход высокосернистой нефти —  $G_{ж1}$ , м<sup>3</sup>/ч.

В результате моделирования были получены температуры в четырех точках:  $\theta_{ж1.расч.}$ ,  $\theta_{ж2.расч.}$ ,  $\theta_{ж3.расч.}$ ,  $\theta_{ж4.расч.}$ . Относительная погрешность определяется по следующей формуле:

$$\Delta = \left| \frac{\theta_{ж4.э} - \theta_{ж4.расч.}}{\theta_{ж4.э}} \right| \cdot 100\% .$$

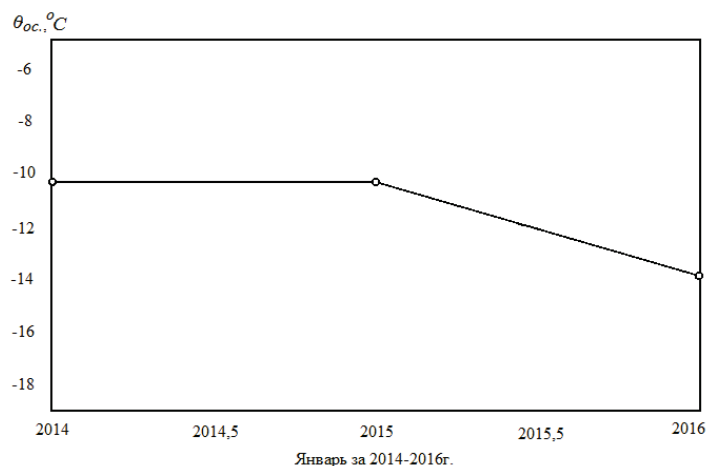
Проведены натурные измерения в летний и зимний периоды при следующих условиях окружающей среды. Данные параметры принимались по статистическим

данным региона Республики Татарстан, то есть самым теплым месяцем считается июль, со средними температурами окружающей среды  $\theta_{oc} = 18-20$  °С, а самым холодным — январь со средними температурами окружающей среды  $\theta_{oc} = -13...-14$  °С. Самый холодный январь был в 2016 году, а самый теплый январь — в 2015-м году (рис. 2, 3).



*Рис. 2. График температуры окружающей среды на фоне разброса температур за весь январь 2016 г.*

Функционально ориентированная модель не позволяет получить зависимость вязкости от температуры смешанной нефти из-за неопределенностей, которые возникают из-за неопределенного компонентного состава нефти, разности объемов подачи потоков нефти и влияния температуры окружающей среды, но позволяет определить температуру в заданной точке как базовый регулируемый параметр.



*Рис. 3. График среднемесячной температуры окружающей среды в январе за 2014–2016 гг.*

Таким образом, на основе вышеизложенного произведем моделирование режима объекта исследования в зимний период при совместной работе функционально ориентированной модели и нечеткого регулятора [4]. Измерения проводились при изменении подачи высокосернистой (ВСН) и сверхвязкой нефти (СВН) при этом установлен диапазон по технологическим ограничениям: минимальный расход

ВСН — 22 м<sup>3</sup>/ч, а максимальный ВСН — 30 м<sup>3</sup>/ч. При этом в экстремальных ситуациях (при изменении температуры окружающей среды  $\theta_{oc} = -30$  °С, температура вокруг трубы  $\theta_{в.тр.} = -4,5$  °С):  $\theta_{ж4.расч.} = 10,02$  °С,  $\theta_{ж3.расч.} = 65,8$  °С,  $\theta_{ж2.расч.} = 74$  °С,  $\theta_{ж1.расч.} = 82$  °С, при подаче пара в ВСН 17 %.

#### *Список литературы*

1. Нурбосынов Д. Н., Табачникова Т. В., Горшкова К. Л. Системный подход и анализ иерархических структур при формализации процесса подготовки и транспортировки потоков нефти как объекта управления // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2015. – № 7. – С. 18–25.
2. Математическая модель тепловых процессов объекта смешивания сверхвязкой и высокосернистой нефти с дальнейшей транспортировкой / Д. Н. Нурбосынов [и др.] // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2013. – № 3. – С. 183–190.
3. Горшкова К. Л., Табачникова Т. В. Снижение энергетических затрат при первичной подготовке и транспортировке нефти на основе системного анализа общей структуры производства // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2015., Т. XIII, № 1. – С. 292–306.
4. Горшкова К. Л. Разработка математической модели регулирования с нечеткой логикой на основе интеллектуальной системы синтеза управления технологическим процессом // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2013. – Т. XI, № 1. – С. 209-214.

#### *Сведения об авторах*

**Горшкова Кристина Леонидовна**, к. т. н., старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 89172750497, e-mail: chri\_leon@mail.ru

**Тугашова Лариса Геннадьевна**, старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(8553)310151, e-mail: tugashova@yandex.ru

#### *Information about the authors*

**Gorshkova K. L.**, Candidate of Engineering, Senior Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Almeteyevsk State Oil Institute, phone: 89172750497, e-mail: chri\_leon@mail.ru

**Tugashova L. G.**, Senior Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Almeteyevsk State Oil Institute, phone: 8(8553)310151, e-mail: tugashova@yandex.ru