

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ

Жолобова Г.Н., Хисаева Е.М., Сулейманов А.А., Галиакбаров В.Ф.  
*Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
кафедра "Вычислительная техника и инженерная кибернетика"*  
*nt-centr77@yandex.ru*

*В настоящее время весьма актуален вопрос улучшения качества обессоливания нефти. В статье приведено применение  $\pi$ -теоремы для вывода критерия Вебера, который характеризует дробление капли и смешение воды и нефти в потоке. Получена модель, связывающая эффективность обессоливания и критерий Вебера.*

Ключевые слова: *скважина, пластовые воды, дисперсная система, соль, переработка, катализатор, остаточный нефтепродукт, обезвоживание и обессоливание нефти, диспергирование, безразмерный показатель, параметр,  $\pi$  – теорема*

Поступающая из нефтяных и газовых скважин продукция не представляет собой соответственно чистые нефть и газ. Из скважин вместе с нефтью поступают пластовые воды, попутный (нефтяной) газ, твердые частицы механических примесей (горных пород, затвердевшего цемента).

Пластовые воды, добываемые с нефтью и образующие с ней дисперсную систему, содержат как правило, значительное количество растворимых минеральных солей. Содержание солей в нефти нередко достигает 2000 - 3000 мг/л и в отдельных случаях доходит до 0,4 - 0,3 %. Особенно большое количество пластовой воды содержится в нефти на завершающей стадии эксплуатации нефтяных месторождений, когда ее содержание может достигать 80 - 90 %, т.е. с каждым кубометром нефти извлекается около 4 м<sup>3</sup> воды

Наличие солей в нефти причиняют особенно тяжелые и разнообразные осложнения при ее переработке. Наиболее вредное воздействие оказывает на работу установок промысловой подготовки и переработки нефти хлористые соли. Хлориды, в особенности кальция и магния, гидролизуются с образованием соляной кислоты даже при низких температурах. Под действием соляной кислоты происходит коррозия, т.е. разъедание металла нефтеперегонной аппаратуры, что приводит к длительным простоям аппаратуры технологических установок.

Соли, откладываясь в трубах, уменьшают их проходные сечения, что в значительной степени снижает производительность. Под воздействием минеральных

солей сокращается срок службы дорогостоящих катализаторов. Кроме того, соли, накапливаясь в остаточных нефтепродуктах – мазуте, гудроне и коксе, значительно ухудшают их качество, что приводит к отказу от их выработки.

Таким образом нормальная переработка соленых нефтей оказывается совершенно невозможной, поэтому особое место отводится вопросам тщательного обезвоживания и обессоливания нефтей как основному условию повышения технико-экономических показателей производства.

В соответствии с современными требованиями остаточное содержание солей в обессоленной нефти поступающей с установки подготовки нефти нефтеперерабатывающих предприятий должно быть на уровне не выше 2 - 3 мг/л, остаточное содержание воды в подготовленной нефти должно быть не более 0,1 мас.%, содержание механических примесей в подготовленной нефти должно быть не более 0,005 мас. %, эффективность обезвоживания и обессоливания должны быть не менее 95 - 90 % соответственно за время пребывания водонефтяных эмульсий в аппаратах обессоливающей установки, как правило, не менее 30 минут.

Обезвоживание и обессоливание нефти осуществляется на установках ЭЛОУ. Данный промышленный процесс основан на применении методов химической, электрической, механической и тепловой обработок нефтяных эмульсий. Применение этих методов в комбинации позволяет разрушать сольватные оболочки и снижать структурно-механическую прочность эмульсий, что создает более благоприятные условия для коагисценции и укрупнения капель пластовой воды, и ускоряет процесс осаждения крупных глобул.

Технологический процесс обессоливания предполагает перед подачей в электродигидрататор смешение нефти с промывной водой. При недостаточном диспергировании промывной воды значительно уменьшается площадь взаимодействия воды и нефти, а так же повышается ее расход. Интенсивность смешения должна быть такова, чтобы промывная вода эффективно диспергировалась и хорошо смешивалась с деэмульгатором.

Для оценки эффективности обессоливания используется безразмерный показатель (1) равный отношению содержания солей в нефти до и после переработки

$$U_{эф} = \frac{C_{вых}}{C_{вх}} \quad (1)$$

В качестве параметров, влияющих на процесс обессоливания, нами были взяты следующие факторы: плотности нефти  $\rho_n$ , линейная скорость подачи воды  $v_{лв}$ , диаметр отверстий подачи воды  $d_в$ , поверхностное натяжения на границе раздела фаз  $\sigma$ . С учетом принятых обозначений уравнение связи исследуемого процесса можно представить в виде

$$\varphi(\rho_n, v_{лв}, d_в, \sigma) = 0. \quad (2)$$

Размерность всех входящих в зависимость (2) величин можно выразить с помощью трех основных переменных M, L, и  $\Theta$  (масса, длина и время) следующим образом:

$$[v_{лв}] = [L][\Theta]^{-1} \text{ или } [м/с];$$

$$[\rho_n] = [M][L]^{-3} \text{ или } [кг/м^3];$$

$$[d_в] = [L] \text{ или } [м];$$

$$[\sigma] = [M][\Theta]^{-2} \text{ или } [Н/м] = \left[ \frac{кг \cdot м}{с^2 \cdot м} \right] = \left[ \frac{кг}{с^2} \right].$$

Составим матрицу размерностей

|            | $[\rho_n]$ | $[v_{лв}]$ | $[d_в]$ | $[\sigma]$ |
|------------|------------|------------|---------|------------|
| [M]        | 1          | 0          | 0       | 1          |
| [L]        | -3         | 1          | 1       | 0          |
| $[\Theta]$ | 0          | -1         | 0       | -2         |

(3)

Т.к. уравнения размерностей независимы, строки матрицы тоже независимы и ранг матрицы соответствует числу строк и равен 3. Число переменных  $n = 4$ , следовательно число безразмерных комплексов, описывающих процесс, должно быть равно  $4 - 3 = 1$ .

По элементам матрицы (3) рассчитаем показатели степени  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , и  $d$ , составив линейную однородную систему уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для [M]} \quad a + d = 0 \\ \text{для [L]} \quad -3a + b + c = 0 \\ \text{для } [\Theta] \quad -b - 2d = 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

Согласно первой  $\pi$ -теореме подобия после замены размерных величин на безразмерные в уравнении (2) получаем уравнение связи, которое содержит  $m - k = 1$  безразмерный  $\pi$ -комплекс (критерий), где  $m = 4$  – число параметров, влияющих на процесс и введенных в уравнение,  $k = 3$  – число независимых параметров, принятых за основные.

Для нахождения вида комплекса свободно выберем значение любого показателя степени, примем  $a = 1$ . Тогда решение системы  $b = 2$ ,  $c = 1$  и  $d = -1$ .

Получим матрицу решений:

$$\begin{array}{c|cccc} & [\rho_n] & [v_{лв}] & [d_n] & [\sigma] \\ \hline \pi & 1 & 2 & 1 & -1 \end{array} \quad (5)$$

Отсюда имеем безразмерный критерий:

$$\pi = \frac{\rho_n v_{лв}^2 d_n}{\sigma} = We. \quad (6)$$

Комплекс представляет собой число Вебера, которое является мерой отношения инерционной силы и силы поверхностного натяжения при движении двухфазной среды и характеризует дробление капли в потоке. Таким образом, возможно установить зависимость между комплексом  $We$  и качеством обессоливания  $U_{эф}$ :

$$U_{эф} = f(We). \quad (7)$$

Для определения зависимости использованы данные промышленных экспериментов, общее количество измерений  $n = 60$ .

Таблица 1

|           |      |      |      |      |     |       |       |       |       |       |      |
|-----------|------|------|------|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| $\ln(We)$ | 6,91 | 7,01 | 7,11 | 7,21 | ... | 11,31 | 11,41 | 11,51 | 11,61 | 11,71 | ...  |
| $U_{эф}$  | 1,45 | 1,23 | 1,52 | 1,03 | ... | 3,37  | 3,94  | 3,14  | 3,01  | 3,36  | .... |

### Результаты промышленных экспериментов

Диаграмма рассеяния точек имеет нелинейный характер, поэтому для поиска формы зависимости использовался полином. С помощью программы Statistica были произведены расчеты коэффициентов корреляции, детерминации и прочих параметров регрессионных моделей для полиномов с первой по 5-ю степень.

Зависимости сравнивались по значению скорректированного коэффициента детерминации  $R_{adj}^2$  (Adjusted RI). Чем ближе значение данного коэффициента к 1, тем точнее результат регрессии.

В табл. 2 приведены основные результаты анализа для полинома 3-ей степени.

Таблица 2

| R = 0,9597         |          | RI = 0,9211      |          | Adjusted RI = 0,9168          |         |         |
|--------------------|----------|------------------|----------|-------------------------------|---------|---------|
| F(3,56) = 217,8000 |          | p < 0,0000       |          | Std.Error of estimate: 0,3045 |         |         |
|                    | BETA     | St. Err. of BETA | B        | St. Err. of B                 | t(56)   | p-level |
| Intercept          |          |                  | 35,1125  | 8,8419                        | 3,9711  | 0,0002  |
| X                  | -23,1349 | 4,5917           | -13,9881 | 2,7763                        | -5,0384 | 0,0000  |
| X2                 | 59,3920  | 9,3464           | 1,8158   | 0,2858                        | 6,3546  | 0,0000  |
| X3                 | -36,2017 | 4,7950           | -0,0729  | 0,0096                        | -7,5499 | 0,0000  |

*Результаты регрессионного анализа для полинома 3-ей степени.*

Для полинома 2-й степени  $R_{adj}^2=0,8351$ . Коэффициент не очень мал, однако при использовании полинома третьей степени результат заметно лучше (приблизенно на 10 %):  $R_{adj}^2=0,9168$ . Для полинома 4-й степени:  $R_{adj}^2=0,9198$ , что лучше коэффициента для третьей степени на 1 %. Для полинома 5-й степени:  $R_{adj}^2=0,9211$  и улучшение составляет менее чем 1 %.

Значение стандартной ошибки отклонения уравнения  $S$  (Std. Error of estimate) существенно уменьшается также при переходе от полинома 2-й степени к полиному 3-й степени (уменьшается на 25 %), а полиномы 4-й и 5-й степени практически не приносят улучшений.

В связи с тем, что полиномы 4-й и 5-й степени существенно не влияют на точность регрессии (по большинству критериев улучшения составляют 1 - 2 % в сравнении с 3-й степенью), отдаем предпочтение полиному 3-й степени.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные и построенная линия регрессии.

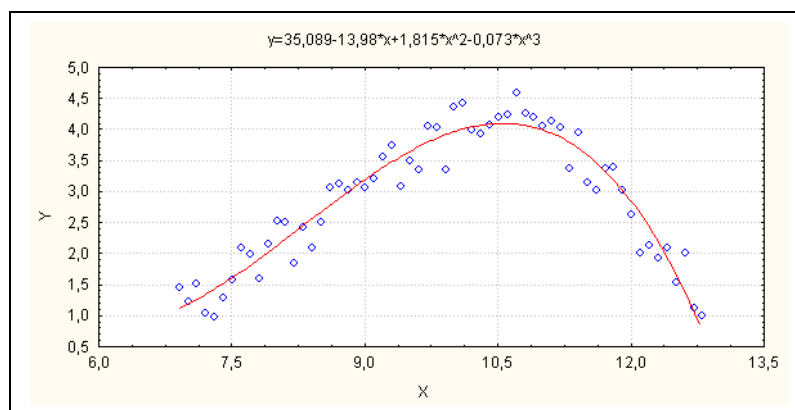


Рисунок 1. Опытные и полученные по регрессионному уравнению значения показателя эффективности обессоливания  $U_{эф}$

Таким образом, установленная форма зависимости имеет следующий вид:

$$U_{\text{эф}} = 35,098 - 13,98 \ln We + 1,815 \ln^2 We - 0,073 \cdot \ln^3 We .$$

Все коэффициенты уравнения значимы на 5 %-ом уровне ( $p\text{-level} < 0,05$ ).

Это уравнение объясняет 91.68 % ( $RI = 0.9168$ ) вариации зависимой переменной.

Результаты дисперсионного анализа уравнения регрессии представлены в табл. 3.

Таблица 3

|          | Sums of Squares | df | Mean Squares | F        | p-level  |
|----------|-----------------|----|--------------|----------|----------|
| Regress. | 60,5930         | 3  | 20,1977      | 217,7976 | 7,74E-31 |
| Residual | 5,1932          | 56 | 0,0927       |          |          |
| Total    | 65,7862         |    |              |          |          |

*Результат дисперсионного анализа.*

F - критерий полученного уравнения регрессии значим на 5 % уровне, т.к. вероятность нулевой гипотезы ( $p\text{-level}$ ) значительно меньше 0,05, что говорит об общей значимости уравнения регрессии.

Максимум полученной функции достигается при  $We = 34\,567$ . Это значение, при котором обеспечивается наилучшее качество обессоливания. Также можно выделить окрестность, во всех точках которой значение функции незначительно меньше самого максимума. На графике эта окрестность представляет собой короткий горизонтальный отрезок, которому принадлежит и точка максимума. Исходя из требований к остаточному содержанию солей, значение радиуса окрестности было принято  $r = 0,125$ . Таким образом, был получен интервал значений  $We \in (28\,998; 37\,234)$  для критерия Вебера  $We$ . Соответствующие полученному интервалу технологические параметры процесса (плотности нефти  $\rho_n$ , линейная скорость подачи воды  $v_{лв}$ , диаметр отверстий подачи воды  $d_в$ , поверхностное натяжения на границе раздела фаз  $\sigma$ ) обеспечат качественный результат обессоливания.

## Литература

1. Технологические расчеты установок переработки нефти: Учебное пособие для вузов / Тантаров М. А., Ахметшина М.Н., Фасхутдинов Р. А. и др. М.: Химия, 1987. 352 с.
2. Технология первичной переработки нефти и природного газа: Учебное пособие для вузов. 2-е изд. М.: Химия, 2001. 568 с.
3. Музафаров А.С. Интенсификация процессов обезвоживания и обессоливания нефти применением гидродинамического излучателя: дис. канд. техн. наук: 05.17.07 ; Уфа, УГНТУ, 1976. 135с.
4. Баймухаметов С.Д. Экспериментальные исследования и разработка рекомендаций по рациональной технологии подготовки глубокообезвоженной и обессоленной нефти на месторождениях Западной Сибири: дис. канд. техн. наук: 05.15.06; Уфа, УГНТУ, 1977. 215с.