

Оптимизация технологических режимов при управлении процессами промысловой подготовки нефти

Т.Н. Караневская, А.Г. Шумихин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

Аннотация: Рассматривается подход к решению задачи, связанной с расчетом оптимальных параметров технологического процесса в установках промысловой подготовки нефти. Алгоритм расчета основан на методе динамического программирования, реализующем принцип оптимальности Беллмана с аддитивным критерием оптимальности. Обобщенный критерий задачи формируется как функция суммы локальных приведенных затрат по стадиям подготовки нефти.

Предложенный метод решения задачи позволяет спрогнозировать оптимальные параметры технологического режима и передать их в систему управления в качестве заданий операторам и автоматическим регуляторам.

Ключевые слова: Промысловая подготовка нефти, установка, технологический режим, модель, оптимизация, оперативное управление.

Введение

В период эксплуатации объектов подготовки нефти и газа происходит изменение технологических параметров добычи сырья (давления, температуры), состава и свойств добываемой нефтяной эмульсии (в частности, увеличивается обводненность нефти), снижаются объемы добычи и, соответственно, производительность установок подготовки нефти.

Для получения оптимального режима необходимо вести непрерывный контроль расходов и обводненности и с учетом изменения этих характеристик производить перерасчет и реализовать необходимые управляющие воздействия в реальном масштабе времени [1].

Технология промысловой подготовки нефти представляет собой многостадийный процесс, характеризующийся набором переменных и управлений по стадиям подготовки нефти [2, 3].

Материалы и методы исследования

Схема многостадийного процесса подготовки нефти с соответствующими обозначениями показана на рис. 1. Описание переменных

и управлений [4] по стадиям подготовки нефти приведено в таблице 1.

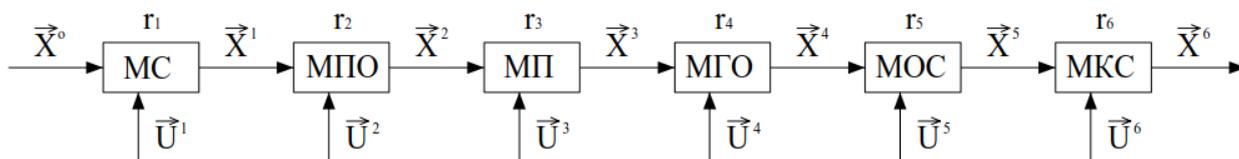


Рис. 1. Блок-схема процесса подготовки нефти

МС – модуль сепарации; МПО - модуль предварительного обезвоживания;
МП – модуль подогрева; МГО – модуль глубокого обезвоживания;
МОС – модуль обессоливания; МКС – модуль конечной степени сепарации.

Таблица 1

Описание переменных и управлений по стадиям подготовки нефти

№ п/п	Стадии процесса подготовки	Вектор входных переменных $\vec{O}^{i-1}, i = \overline{1,6}$	Вектор выходных переменных $\vec{X}^i, i = \overline{1,6}$	Вектор управлений $\vec{U}^i, i = \overline{1,6}$	Функция (модель), связывающая переменные
1	сепарация	$Q_{нгс}, w_{нгс}, T_{нгс}, P_{нгс}$	$Q_{жс}, Q_{г1}, P_{жс}$	$P_c, \tau_c, L_{жс}$	$F_1(\vec{X}^0, \vec{X}^1, \vec{U}^1) = 0$
2	предварительное обезвоживание		$Q_{ж1}, Q_{в1}, P_{ж1}, w_{н1}$	$P_{по}, Q_{дэ}, \tau_{по}$	$F_2(\vec{X}^1, \vec{X}^2, \vec{U}^2) = 0$
3	подогрев		$T_{ж1}$	T_n, F_m, Q_m	$F_3(\vec{X}^2, \vec{X}^3, \vec{U}^3) = 0$
4	глубокое обезвоживание		$Q_{ж2}, Q_{в2}, P_{ж2}, w_{н2}$	$P_{го}, T_{го}, \tau_{го}$	$F_4(\vec{X}^3, \vec{X}^4, \vec{U}^4) = 0$
5	обессоливание		$Q_{н1}, Q_{в3}, Q_{соль}, P_{н2}, w_n$	$P_{ос}, Q_{пр.в}, \tau_{ос}$	$F_5(\vec{X}^4, \vec{X}^5, \vec{U}^5) = 0$
6	концевая степень сепарации		$Q_n, Q_{г2}, P_{г2}$	$P_{кс}, \tau_{кс}, L_{кс}$	$F_6(\vec{X}^5, \vec{X}^6, \vec{U}^6) = 0$

Условные обозначения: Q – расход; w – обводненность; T – температура; P – давление; τ – время пребывания; L – уровень; F_m – поверхность теплообмена.
Индексы переменных: $нгс$ – нефтегазожидкостная смесь; $жс, ж1, ж2$ – жидкость (1, 2); $г, г1, г2$ – газ (1, 2); $в1, в2, в3$ – вода 1 (2, 3); $н, н1, н2$ – нефть (1, 2); $дэ$ – деэмульгатор; $т$ – топливо; $пр.в$ – пресная вода.
Индексы стадий подготовки: $с$ – сепарация; $по$ – предварительное обезвоживание; $п$ – подогрев; $го$ – глубокое обезвоживание; $ос$ – обессоливание; $кс$ – конечная степень сепарации.

Пластовая нефть с определенным составом и свойствами поступает на установку и проходит несколько ступеней (стадий) подготовки. Каждое стационарное состояние нефтяной эмульсии на стадии характеризуется

определенным набором переменных. В результате определенного набора управлений на стадии на выходе получается продукт с составом \vec{X}^i (i – стадия подготовки), что соответствует набору управлений, реализуемому в каждом конкретном случае из допустимого набора управлений стадии.

На рис. 2 представлена структурная схема модели процесса, отображающая связь переменных на стадиях подготовки нефти.

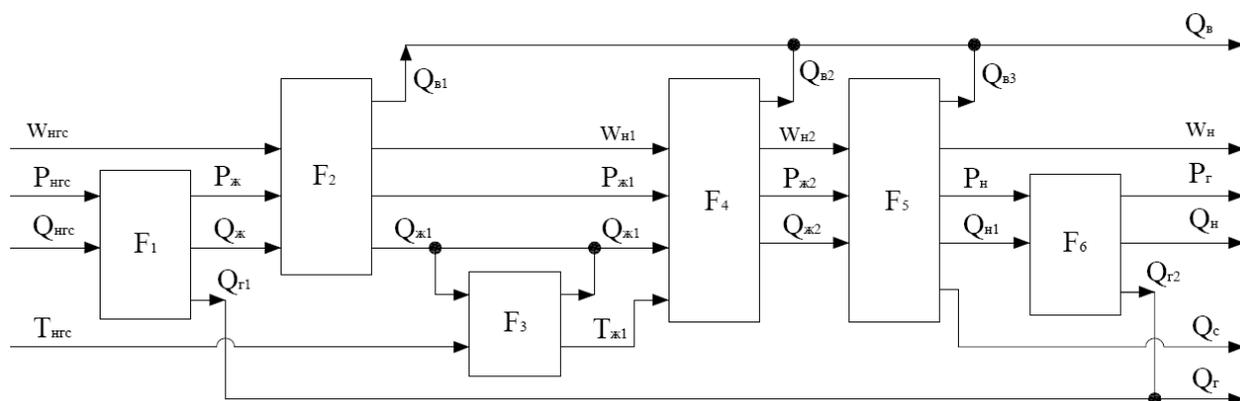


Рис. 2. Структурная схема модели процесса подготовки нефти

Выбор и реализация управлений на любой стадии подготовки связана с некоторым значением критерия оптимальности этой стадии. Критерий оптимальности для всего многостадийного процесса R формулируется как аддитивная функция критериев оптимальности каждой стадии r_i :

$$R(\vec{X}^0, \vec{U}) = \sum_{i=1}^6 r_i(\vec{X}^{i-1}, \vec{U}^i) \quad (1)$$

Требуется найти такой набор управлений с учетом ограничений на них и значения выходных переменных каждой стадии, чтобы критерий оптимальности всего процесса R достиг экстремального значения.

Сформулированная задача оптимизации запишется следующим образом:

$$\left\{ R(\vec{X}^0, \vec{U}) = \sum_{i=1}^6 r_i(\vec{X}^{i-1}, \vec{U}^i) \rightarrow \min | U = \cup_i \vec{U}^i, i = \overline{1,6}; \vec{U} \in \vec{U}_{\text{доп}}; \vec{X} \in \vec{X}_{\text{доп}}, \vec{X} = \cup_i \vec{X}^i \right\} \rightarrow \vec{U}_{\text{opt}}, i = \overline{1,6}, \quad (2)$$

где i – стадия технологического процесса.

Решение задачи обычным перебором вариантов имеет существенный недостаток, который состоит в том, что при решении задачи оптимизации требуется производить анализ всех возможных вариантов, число которых очень быстро возрастает с ростом числа стадий и числа допустимых состояний на них. Например, если число стадий 6, а число состояний на каждой стадии 3, то необходимо проанализировать 3^6 вариантов, т.е. 729.

При такой постановке задачи оптимизации для ее декомпозиции может быть применен метод динамического программирования, реализующий принцип оптимальности Р. Беллмана для многостадийных процессов [5].

Решение задачи с использованием принципа оптимальности Р. Беллмана для многостадийных процессов дает существенный выигрыш в количестве необходимых вычислений, в соответствии с которым решение задачи оптимизации должно выполняться с выбора оптимального управления на последней стадии, затем на предпоследней и т.д., двигаясь от конца процесса к его началу.

Исходной информацией для алгоритма оптимизации являются временные ряды (тренды) технологических параметров установки подготовки нефти в режиме ее нормальной эксплуатации, а также обработанные статистически данные периодического лабораторного контроля показателей качества (ПК) и экономические данные для формирования частных критериев оптимальности стадий [6].

В качестве примера рассмотрена задача оптимизации одной из стадий процесса (стадии предварительного обезвоживания) по частному критерию r_2 , представляющему собой себестоимость 1 тонны подготовленной нефти.

Постановка и решение задачи оптимизации включает следующие шаги:

1) определение параметров модели расчета ПК в форме уравнения регрессии, полученного при обработке экспериментальных данных – обводненности нефти на выходе со стадии предварительного обезвоживания;

2) определение параметров модели расчета для стадии предварительного обезвоживания показателя технико-экономической эффективности (ПТЭЭ) r_2 – себестоимости 1 тонны подготовленной нефти;

3) поиск оптимума критерия r_2 (себестоимости) в пространстве допустимых значений технологических параметров.

Параметры моделей расчета ПК и ПТЭЭ получены с оценкой значимости уравнений регрессии и проверкой их адекватности экспериментальным данным по критерию Фишера [7-9].

Полученные по экспериментальным данным конкретной установки модели расчета ПК и ПТЭЭ используются на третьем шаге для оптимизации процесса из условия минимума суммарных затрат на стадии 2 подготовки нефти [10]:

$$\frac{\partial r_2(\bar{U}^2)}{\partial U_j^2} = 0, j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где $U_j^2, j = \overline{1, m}$ – изменяемые технологические переменные, входящие в регрессионные уравнения расчета функции обводненности на выходе стадии 2 (расход жидкости $Q_{жс}$, температура в аппарате t_{an} и др.).

Для нахождения оптимальных условий ведения технологического процесса находятся и приравниваются к нулю частные производные от полученного уравнения регрессии для суммарных затрат на стадии в пространстве варьируемых переменных - температуры в аппарате, нормы деэмульгатора и времени пребывания жидкости в аппарате. Расход жидкости и ее обводненность не относятся к варьируемым переменным, так как определяются промыслом или регулятором, обеспечивающим заданное значение обводненности на выходе, которое определяется стандартами на качество подготовки нефти.

Поиск оптимума критерия r_2 с учетом ограничений на управляющие переменные осуществляется методом нелинейного программирования.

Ниже приведены результаты оптимизации по критерию суммарных затрат на стадии предварительного обезвоживания.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании показателей операционных затрат по технологической подготовке нефти действующей установки предварительного сброса пластовой воды (УПСВ) получены зависимости суммарных затрат на стадии предварительного обезвоживания от температуры, времени пребывания жидкости в аппарате УПСВ и нормы расхода деэмульгатора.

По рис. 3 видно, что зависимость суммарных затрат от температуры в аппарате при разных расходах деэмульгатора не является монотонной, и для достижения обводненности нефти на выходе менее 5% масс. минимум суммарных затрат $Z_{\text{сум.}} = 3\,692\,668$ руб./мес. обеспечивается при $T=40$ °С и норме расхода деэмульгатора $g_{\text{дэ}} = 20$ г/т нефти. При более низких температурах данный расход деэмульгатора не обеспечивает достижение обводненности нефти на выходе менее 5% масс., в связи с чем при большем расходе деэмульгатора суммарные затраты увеличиваются. При более высоких температурах возрастают затраты на топливо.

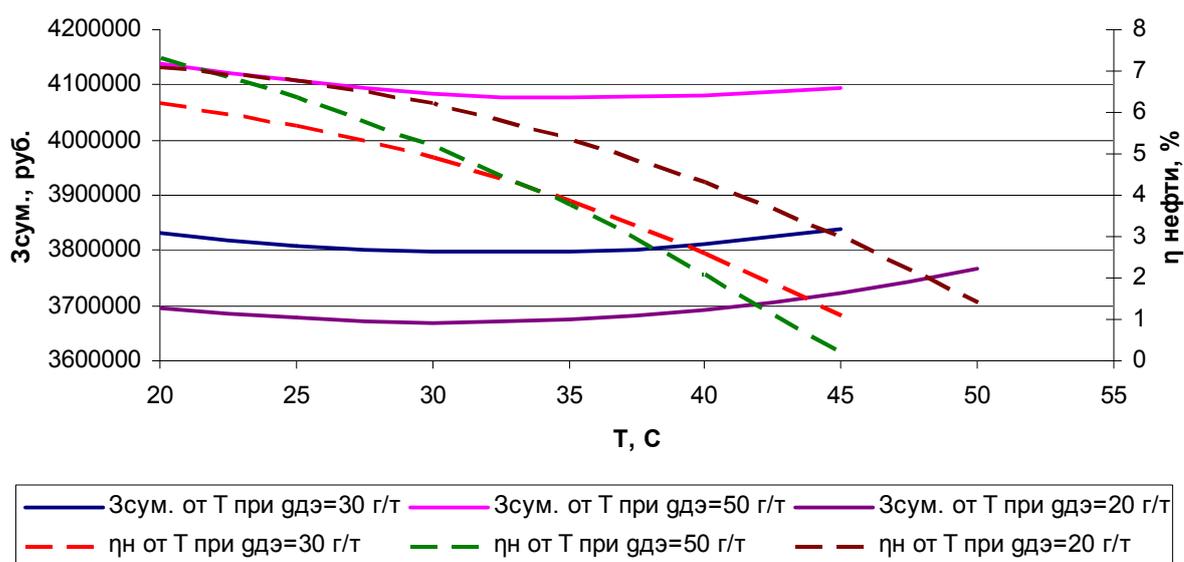


Рис. 3. Зависимость суммарных затрат от температуры в аппарате

при разных расходах деэмульгатора

На рис. 4 представлена зависимость суммарных затрат от норм расхода деэмульгатора при температурах 30 °С и 40 °С, где также видно, что для достижения обводненности нефти на выходе менее 5% масс. минимум суммарных затрат $Z_{\text{сум.}} = 3\,692\,668$ руб./мес. обеспечивается при норме деэмульгатора $g_{\text{дэ}} = 20$ г/т нефти и $T=40$ °С.

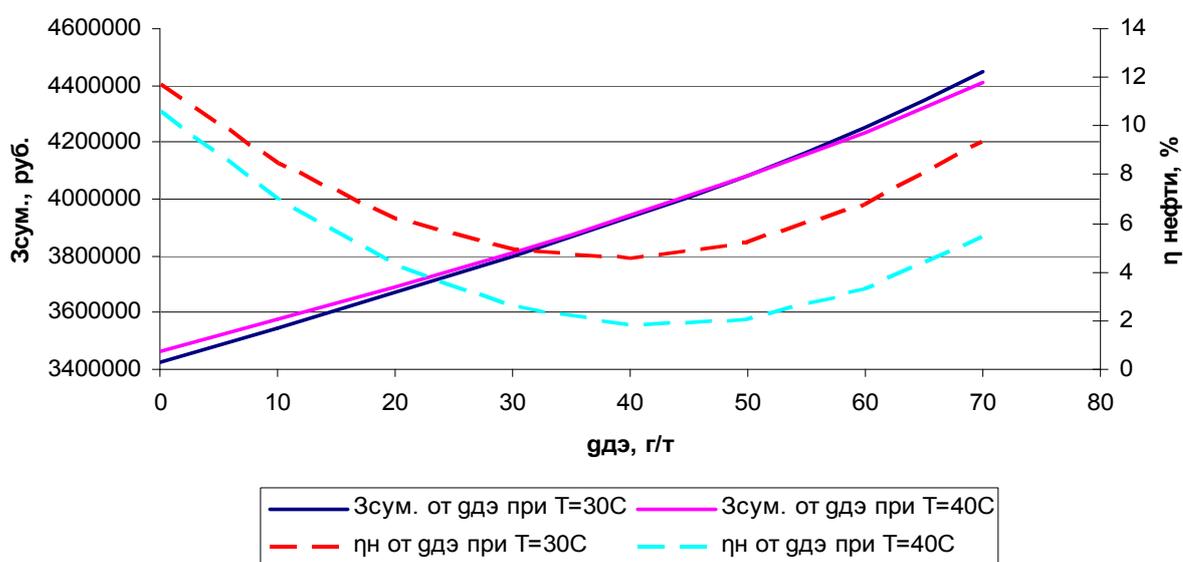


Рис. 4. Зависимость суммарных затрат от норм расхода деэмульгатора при температурах 30 °С и 40 °С

На промысле в данное время в исследуемых аппаратах УПСВ для достижения обводненности менее 5% масс. поддерживаются значения технологических параметров: $t_{\text{ан}} = 40$ °С, $g_{\text{дэ}} = 30$ г/т и $\tau_{\text{пр}} = 30$ мин, при которых суммарные затраты на подготовку нефти составляют $Z_{\text{сум.}} = 3\,812\,876$ руб./мес.

Оптимизация технологического процесса подготовки нефти по критерию минимума себестоимости достигается при поддержании значений технологических параметров: $t_{\text{ан}} = 40$ °С, $g_{\text{дэ}} = 20$ г/т и $\tau_{\text{пр}} = 30$ мин, при

которых экономия суммарных затрат на подготовку нефти составляет $\Delta Z_{\text{сум.}} = 120\,208$ руб./мес. или $1\,442\,496$ руб./год.

Разработка программной оперативно-управляющей системы оптимизации технологических режимов работы оборудования является актуальной научной задачей. Система позволяет учесть динамику изменения показателей работы действующих установок с целью оперативного управления и минимизировать затраты по эксплуатации технологических объектов промышленной подготовки нефти.

Структурная схема алгоритмов автоматизированной оперативной системы управления технологическими процессами установок промышленной подготовки нефти представлена на рис. 5.

Условные обозначения:

$t_{\text{аі}}^{\text{сă}}, g_{\text{ăŷ}}^{\text{сă}}, \eta_i^{\text{сă}}$ - заданные значения температуры в аппарате, расхода деэмульгатора и обводненности нефти;

$t_{\text{аі}}, g_{\text{ăŷ}}, \eta_i, \tau_{i\delta}$ - фактические значения температуры в аппарате, расхода деэмульгатора, обводненности нефти и времени пребывания жидкости в аппарате;

$t_{\text{аі}}^{\text{ііò}}, g_{\text{ăŷ}}^{\text{ііò}}, \tau_{i\delta}^{\text{ііò}}$ - оптимальные значения температуры в аппарате, расхода деэмульгатора и времени пребывания жидкости в аппарате;

P1, P2, P3 – регуляторы температуры, расхода деэмульгатора и обводненности нефти.

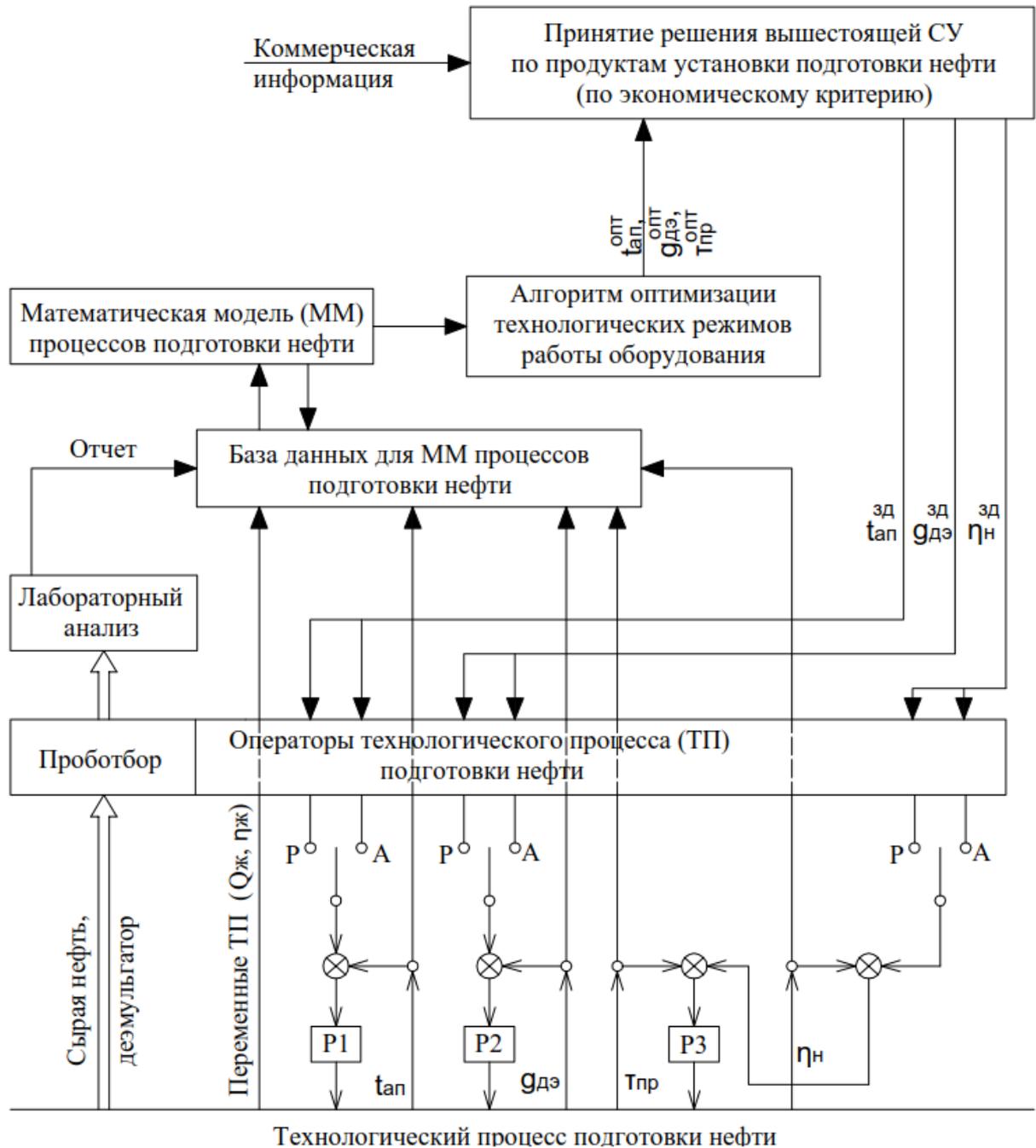


Рис. 5. Структурная схема алгоритмов автоматизированной оперативной системы управления технологическими процессами

Решение задачи управления осуществляется с целью прогнозирования (расчета) параметров нового технологического режима, передаваемых в систему управления в качестве заданий операторам и автоматическим регуляторам.

Заключение

Анализ результатов экспериментальной проверки метода и алгоритма управления технологическими объектами промышленной подготовки нефти показал, что функция приведенных затрат (показателя технико-экономической эффективности) от таких технологических параметров как температура, время пребывания в аппарате и нормы деэмульгатора не является монотонной.

Оптимизация технологических режимов позволяет повысить эффективность работы установки и сэкономить до 15 % суммарных затрат на подготовку нефти.

Предложенная концепция решения задачи оптимизации технологических режимов при управлении объектами промышленной подготовки нефти предназначена для реализации в автоматизированной оперативно-управляющей системе установки.

Литература

1. Караневская Т.Н. Задача комплексной оптимизации технологических систем промышленного обустройства // Химия. Экология. Урбанистика. – Пермь, 2018. – Т. 1. – С. 684-688.
2. Бормотова Т.Н., Сокольчик П.Ю. Анализ и представление данных о модульных технологических системах сбора, подготовки и транспорта нефти // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2015. №3. С. 7-20.
3. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Ивашкина Е.Н., Шарова Е.С. Системный анализ химико-технологических процессов // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 96 с.
4. Леонтьев С.В., Курзанов А.Д., Радыгин Р.В. Комплексный подход при обосновании факторов управления качеством процесса

структурообразования неавтоклавнога газобетона // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4685.

5. Караневская Т.Н. Применение метода динамического программирования в задачах оптимизации параметров нефтепромысловых систем // В сборнике: Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых. – Нижневартовск, 2017. – С. 258-263.

6. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.

7. Сташков С.И., Шумихин А.Г., Сокольчик П.Ю. Прогнозирование и управление качеством битумов на основе формальных моделей // Инженерный вестник Дона, 2019, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2019/5508.

8. Process Modelling and Univariate Analysis of Comminution Circuits / T. Song, T.H. Yang, J.W. Zhou, Q.K. Wang // IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 21, 2018, PP. 19-23.

9. Meerschaert M. Mathematical Modeling. Academic Press, 2013. - 384 p.

10. Лapidус А.С. Экономическая оптимизация химических производств. – М.: Химия, 1986. – 208 с.

References

1. Karanevskaja T.N. Himija. Jekologija. Urbanistika. 2018. V. 1. pp. 684-688.

2. Bormotova T.N., Sokol'chik P.Ju. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Himicheskaja tehnologija i biotehnologija. 2015. № 3. pp. 7-20.



3. Sistemnyj analiz himiko-tehnologicheskikh processov [System analysis of chemical and technological processes]. Kravcov A.V., Ivanchina Je.D., Ivashkina E.N., Sharova E.S. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2008. 96 p.
4. Leont'ev S.V., Kurzanov A.D., Radygin R.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4685.
5. Karanevskaja T.N. Opyt, aktual'nye problemy i perspektivy razvitija neftegazovogo kompleksa. 2017. pp. 258-263.
6. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii [Methods of experiment optimization in chemical technology]. 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 327 p.
7. Stashkov S.I., Shumihin A.G., Sokol'chik P.Ju. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5508.
8. Song T., Yang T. H., Zhou J. W., Wang Q. K. IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 21, 2018, pp. 19-23.
9. Meerschaert M. Mathematical Modeling. Academic Press, 2013. - 384 p.
10. Lapidus A.S. Jekonomicheskaja optimizacija himicheskikh proizvodstv [Economic optimization of chemical production]. Moscow: Himija, 1986, 208 p.