

СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Разработана математическая модель прогнозирования пожароопасных ситуаций атмосферной ректификационной колонны К-2 технологической установки первичной переработки нефти, основанная на применении тензорных методов моделирования и расчёте сложных систем с использованием сетевых моделей.

Ключевые слова: сетевая модель прогнозирования, тензорный метод, технологическая установка первичной переработки нефти (ТУ ЭЛОУ АВТ-6).

A.V. Fedorov, M.I. Lebedeva, A.E. Petrov

NETWORK MODEL FOR PREDICTING FIRE SITUATIONS IN PROCESSES OF PRIMARY OIL REFINING

A mathematical model for predicting fire situations atmospheric distillation column K-2 processing plants for primary processing of oil, based on the application of tensor methods for modeling and analysis of complex systems using network models.

Key words: network forecasting model, the tensor method, technological installation of primary oil refining.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 21 октября 2014 г.

Описание всего процесса первичной переработки нефти в виде сетевой модели является достаточно трудоёмким. В качестве примера применения тензорного метода сетевого моделирования рассмотрим блок № 8 "Атмосферная ректификационная колонна К-2", который, как показывает анализ пожарной опасности *технологической установки первичной переработки нефти (ТУ ЭЛОУ АВТ-6)* [1, 2], является наиболее опасным блоком в данной установке.

В установке первичной переработки нефти основными являются потоки парогазовой смеси нефти на входе, потоки фракций, получаемые на выходе, а также потоки пара. В процессе массообмена в колонне фракции переходят из газовой фазы в жидкую фазу. Тепловые потоки обеспечивают технологический процесс, обусловленный нагревом (печи, пар) и охлаждением (теплообменники, нагреватели, охладители).

Воздействиями являются изменения температуры, давления, скорости потока и т.д. *Откликами на воздействия* являются потоки нефти на входе, потоки фракций, пара в жидкой и газообразной фазах в колонне *атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ)* и на выходе. В зависимости от типа пути (открытый путь для основного процесса, контуры для циркулярных орошений, тепловых потоков, нагрева, охлаждения), величины воздействий и откликов могут меняться местами.

Рассмотрим построение сетевой модели установки первичной переработки нефти, в которой в качестве потоков есть сырая нефть на входе, которая в процессе ректификации разделяется на четыре фракции, газ и мазут, а также поток перегретого пара.

Анализ функциональных особенностей данной установки показывает, что для представления элементов и процессов установки необходимо не менее 18 ветвей, соединённых в сетевую модель. Структура сетевой модели состоит из соединённых между собой ветвей, каждая из которых представляет определённые элементы установки в соответствии с их функциональным назначением. Это основные потоки от входа до выхода, а также контуры: контур перегретого пара, три циркулярных орошения и острое орошение.

Построение сетевой модели реальной установки в исследовательских целях ограничивается количеством ветвей, которые можно разместить для обозрения на странице. Полученную в результате такого моделирования методику можно расширять на необходимое количество компонент практически неограниченно. Тензорный метод двойственных сетей обеспечивает возможность декомпозиции сложной сети на подсети необходимого размера и расчёта их по частям. Возможно использование вычислительных систем с параллельной архитектурой, когда отдельные части рассчитываются на отдельных процессорах. Это удобно при необходимости анализа функционирования установки по отдельным блокам и с разной компоновкой её агрегатов, как в интересах проектирования, так и в интересах анализа последствий отключения разных подсистем при аварийных ситуациях [3, 4].

Рассмотрим сетевую модель из 18 ветвей, которая в минимально возможной форме учитывает основные особенности исследуемой установки. Сеть включает в себя входной поток сырья, нагретой нефти, вывод мазута, фракции 290-350 °С. Включены три контура *циркуляционного орошения (ЦО)*, которые обеспечивают выделение трех других фракций, а также острое орошение в шлемовой части колонны с выводом парогазовой фракции. Кроме того, отдельным контуром представлена циркуляция перегретого пара, предназначенная для отпаривания компонентов в нижней части колонны.

Структура сетевой модели установки К-2 представлена на рис. 1. Узел К рассматривается как заземление. Из него поступает входной поток сырьевой нефти, в него же поступают все разделённые в процессе ректификации фракции.

Расчёт матриц решения для структуры данной сетевой модели проведём отдельно для контурной сети и узловой сети. Полагаем, что "сопротивления" ветвей равны единицам, чтобы упростить расчёты. В дальнейшем можно ввести метрику и вместо единиц подставить инерционные характеристики агрегатов установки: массу потоков, вязкость нефтепродуктов, энтальпии, теплоемкость, и т.д. Тогда метрическая матрица будет представлять сопротивление со стороны агрегатов установки проходящему потоку массы сырья и фракций, взаимные коэффициенты представят влияние одних контуров на другие.

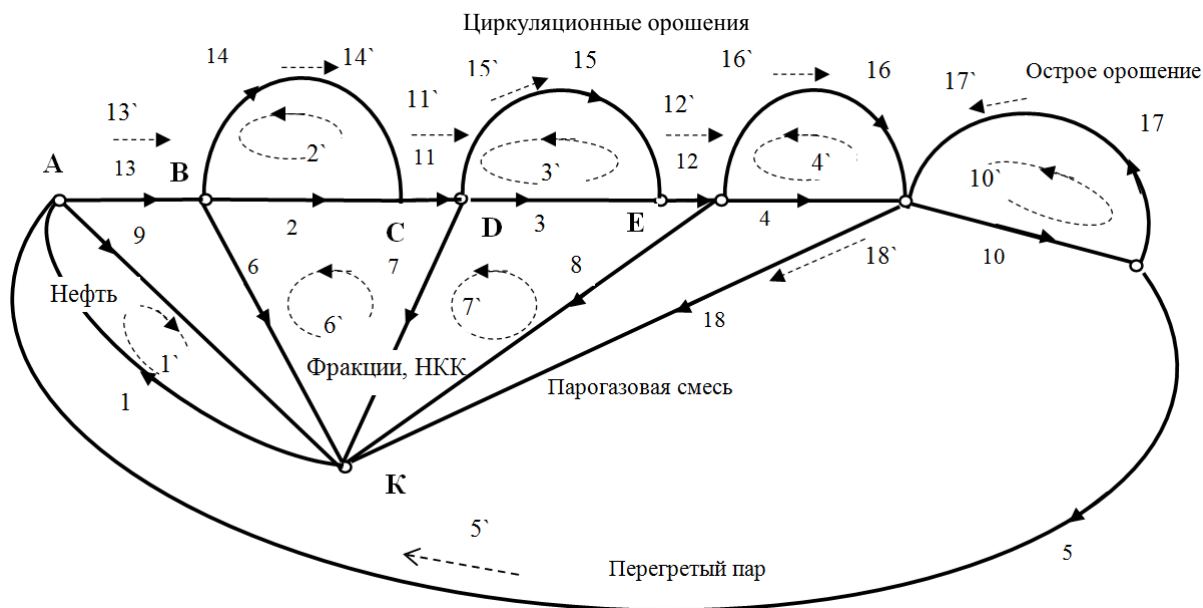


Рис. 1. Сетевая модель колонны К-2 с контурами (три циркуляционных орошения и острое орошение, цикл перегретого пара) и заземлением в узле А

Получив матрицы решения, зададим воздействия и рассчитаем отклики, которые оценим на соответствие реальным значениям потоков материи и потоков тепла.

Структура сети обладает следующей топологией. Число ветвей $n = 18$, узлов $J = 9$, подсетей $s = 1$, разомкнутых путей $j = 9 - 1 = 8$, контуров $m = 18 - 8 = 10$.

Матрица преобразования путей C при переходе от свободных ветвей к связанной сети принимает следующий вид для путей, выбранных на рис. 1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	m
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	m
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	m
5	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	m
6	0	-1	0	0	0	1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	m
7	0	0	-1	0	0	0	1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	m
8	0	0	0	-1	-1	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	m
9	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	m
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	m
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	j
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	j
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	j
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	j
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	j
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	j
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	j
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	j

Таким образом составляется матрица для расчёта контурной сети, в которой используется подматрица ${}^m C$, определяющая контуры.

Задача расчёта цепи состоит в определении откликов в соединённых ветвях $\alpha = 1, \dots, n$ при заданных воздействиях в отдельных ветвях, причём должны удовлетворяться законы Кирхгофа о равенстве нулю суммы токов в каждом узле и равенстве нулю суммы напряжений в каждом контуре.

Матрица решения контурной сети рассчитывается по формуле:

$$Y_c = {}^m C_{\alpha}^{\alpha} ({}^m C_{\alpha}^{\alpha} Z_{\alpha\beta} {}^m C_{\beta}^{\beta})^{-1} {}^m C_{\alpha}^{\alpha}, \quad (1)$$

где Y_c – матрица решения контурной сети;

${}^m C_{\alpha}^{\alpha}$ – часть матрицы преобразования, которая относится к базисным контурам в связанной цепи;

$Z_{\alpha\beta}$ – матрица сопротивления;

${}^m C_{\beta}^{\beta}$ – матрица преобразования путей для узловой цепи.

В сетевой модели внутренними воздействиями являются источники *электро-движущей силы (ЭДС)*, а в реальной системе, например, насосы, создающие давление. В сетевой модели откликами являются контурные токи, токи и напряжения на отдельных ветвях, а в реальной системе – потоки нефти и её продуктов (жидкие, газовые, парогазовые). Таким образом, получена квадратная матрица, умножение которой на внутренний источник воздействия, например вектор источников ЭДС e_{α} , позволяет сразу получить отклики в ветвях – токи i_c^{β} .

Введём вектор воздействий, умножим на него матрицу решения – получим отклики. Например, пусть источники ЭДС в отдельных ветвях заданы вектором:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$e_{\alpha} =$	150	15	10	14	52	20	25	25	10	10	1	1	1	10	8	12	-6	16

Тогда, при умножении матрицы решения на этот вектор, токи i_c^{α} и e_{α}^c напряжения в ветвях связанной сети принимают значения:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$i_c^{\alpha} =$	102,1	13,1	6,4	4,1	0,9	23,9	10,5	4,5	57,9	2,5	21,2	10,7	45,1	8,1	4,4	2,1	1,5	5,3

Эти значения представлены на рис. 2. Отклики удовлетворяют законам Кирхгофа в узлах и по контурам (с учётом округлений), что является проверкой правильности расчётов.

Можно видеть, что по ветви 1 поступает поток исходного сырья, который разделяется на поток мазута в ветви 9 и остальные фракции в ветви 13 вместе с потоком пара из ветви 5. Далее из парогазовой смеси отделяется фракция *высококипящих компонентов (ВКК)* по ветви 6. Оставшийся поток проходит три ЦО, в результате выделяются три фракции *низкокипящих компонентов (НКК)*, включая бензин и газ после острого орошения. В узле К, который рассматривается как заземление, сохраняется баланс входного потока и выходных потоков, каждый из которых выводится по своему пути.

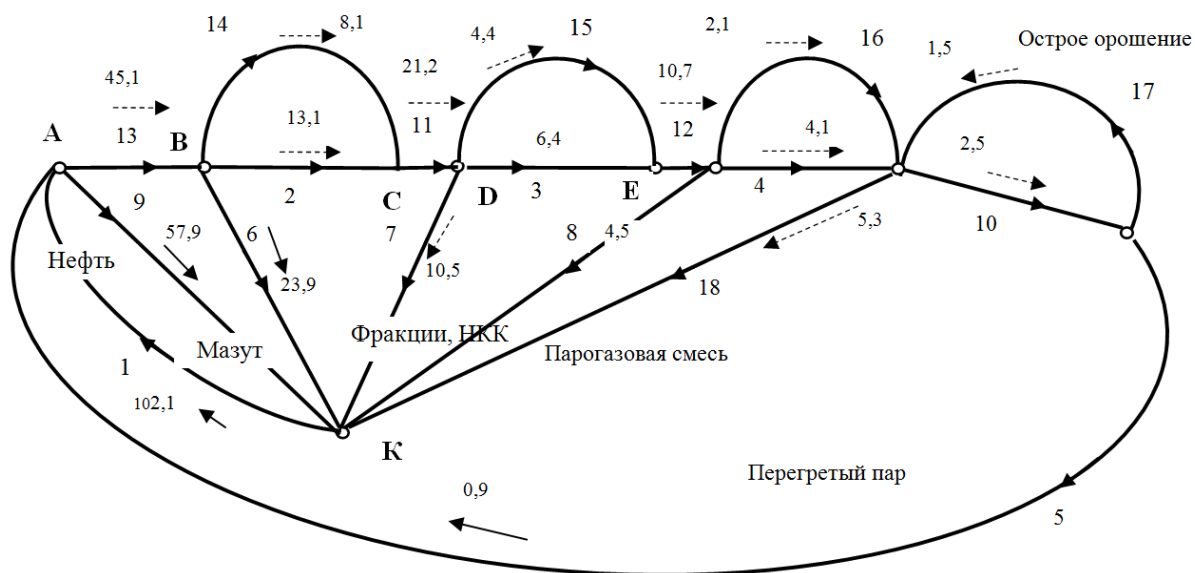


Рис. 2. Сетевая модель колонны К-2 с контурами (три циркулярных и острое орошения, цикл перегретого пара) и заземлением в узле А. Результаты расчёта контурной сети с источниками ЭДС

Полученный результат в пропорциях соответствует распределению потоков нефтепродуктов, которое должно происходить в реальной колонне. Таким образом, при надлежащей настройке данную сетевую модель можно применять для анализа процессов ректификации фракций в реальной установке.

Матрицу решения можно применять для автоматического получения откликов на разные варианты воздействий простым умножением на новый вектор. Это показано в табл. 1, где даны несколько вариантов воздействий в виде давления насосов и соответствующие им отклики-потоки, аналоги потоков нефтепродуктов в ветвях сетевой модели. Расчёты матрицы решений и откликов проведены в программе работы с электронными таблицами Microsoft Excel.

Таблица 1

Аналоги потоков нефтепродуктов в сетевой модели при разных воздействиях

Номера ветвей	Воздействия	Отклики	Воздействия	Отклики	Воздействия	Отклики
1	300	195,8	200	156,2	120	124,1
2	5	5,4	5	10,8	0	1,6
3	5	3,0	5	11,4	0	2,1
4	45	11,5	45	19,6	20	1,6
5	100	6,5	200	48,4	87	1,9
6	20	50,2	55	32,1	55	14,9
7	25	16,9	88	10,8	88	11,1
8	25	-2,0	140	-1,5	120	16,9
9	10	114,2	80	123,8	80	75,9
10	5	0,8	5	16,7	5	9,5
11	0	37,9	0	48,6	0	35,2
12	0	21,0	0	37,8	0	24,1
13	14	88,0	14	80,7	14	50,1
14	32	32,4	32	37,8	32	33,6
15	20	18,0	20	26,4	20	22,1
16	45	11,5	45	19,6	24	5,6
17	-10	-5,8	-20	-31,7	12	7,5
18	10	16,5	87	-9,1	90	5,3

Таким образом, можно рассмотреть различные варианты поведения системы ректификации при первичной переработке нефти для заданной конструкции (структуры) при изменении воздействий в различных агрегатах и узлах установки.

Рассмотрим функционирование установки при заданных источниках воздействия, но при изменениях структуры, связанных с возможными авариями, которые могут создать пожароопасный режим.

Пусть в структуре сетевой модели разорваны (разрушены) два контура – острое орошение, где ветвь 17 оторвана от узла Н, и вывод газовой фракции, где ветвь 18 оторвана от узла F, как показано на рис. 2. Тогда в матрицах преобразования C и A произойдут изменения – два контура, соответственно 9 и 10, превратятся в разомкнутые пути.

Сами алгоритмы расчёта при этом не меняются. Таким образом, снова рассчитаем контурную и узловую сети, получим матрицы решения. Используя прежние значения воздействий, получим отклики и сравним их с теми, которые были получены для заданной структуры установки.

Структура новой сети имеет топологию: число ветвей $n = 18$, число узлов $J = 11$, подсетей $s = 1$, разомкнутых путей $j = 11 - 1 = 10$, контуров $m = 18 - 10 = 8$.

Матрица преобразования путей C имеет тот же вид, что и для сети на рис. 1, однако два пути теперь относятся к базису разомкнутых путей, соответственно размерность подпространства контуров уменьшается на 2, размерность подпространства разомкнутых путей возрастает на 2.

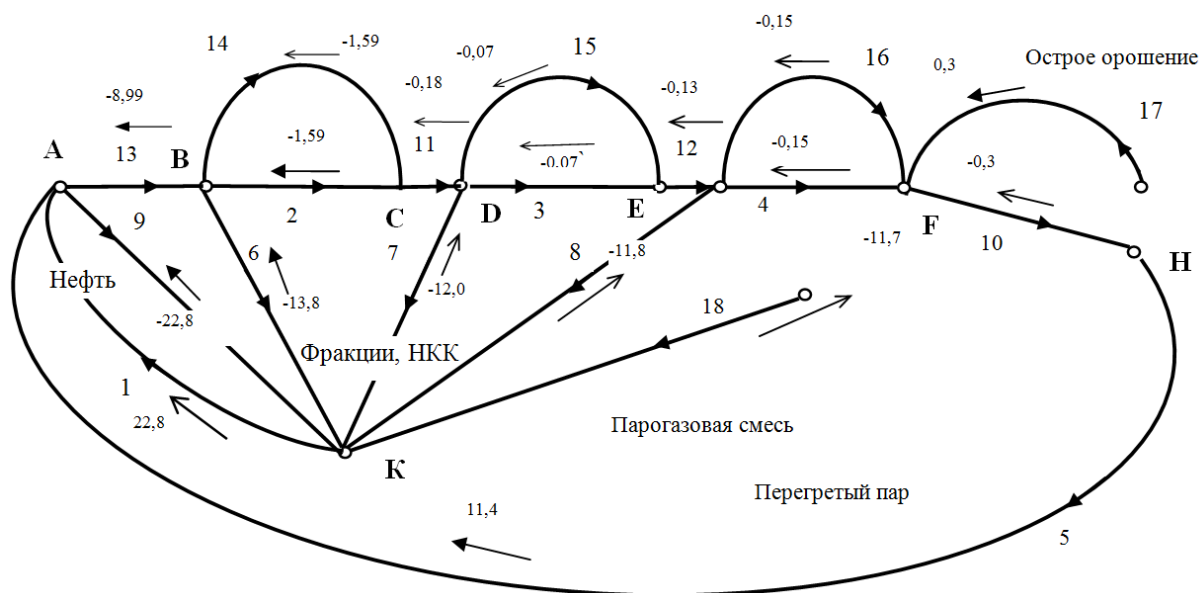


Рис. 3. Сетевая модель колонны К-2 с отрывами ветви 17 от узла Н и ветви 18 от узла F

Таким образом, матрица преобразования контурной сети ${}^m C$, определяющая контуры, принимает следующий вид:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	t
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	t
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	t
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	t
5	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	t
6	0	-1	0	0	0	1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	t
7	0	0	-1	0	0	0	1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	t
8	0	0	0	-1	-1	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	t

Матрица решения контурной сети рассчитывается по формуле (1)

Воздействиями являются источники ЭДС, а в реальной системе, например, насосы, создающие давление. Откликами являются контурные токи, токи и напряжения на отдельных ветвях, а в реальной системе – потоки нефти и её продуктов (жидкие, газовые, парогазовые). Полученную матрицу умножим на вектор воздействия e_α , чтобы получить отклики – токи i_c^β .

Возьмём прежний вектор воздействий, умножим на него матрицу решения – получим отклики. Таким образом, источники ЭДС в отдельных ветвях заданы вектором:

$$e_{\alpha 1} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & & & \hline \hline 150 & 15 & 10 & 14 & 52 & 20 & 25 & 25 & 10 & 10 & 1 & 1 & 1 & 10 & 8 & 12 & -6 & 16 & & & \hline \hline \end{array}$$

При умножении матрицы решения на данный вектор, токи $i_c^\alpha = e_\alpha^c$ напряжения в ветвях связанной сети принимают следующие значения:

$$i_{c 1}^\alpha = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & & & \hline \hline 101,2 & 13,0 & 5,9 & 2,6 & 3,1 & 24,4 & 11,3 & 6,6 & 58,8 & 3,1 & 21,1 & 9,8 & 45,4 & 8,0 & 3,9 & 0,6 & 0 & 0 & & & \hline \hline \end{array}$$

Сравним полученные результаты со значениями потоков в установке, работающей в штатном режиме, которые представлены выше для тех же значений воздействий, то есть все насосы, другие воздействия работают, но часть элементов отключена.

$$i_c^\alpha = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & & & \hline \hline 102,1 & 13,1 & 6,4 & 4,1 & 0,9 & 23,9 & 10,5 & 4,5 & 57,9 & 2,5 & 21,2 & 10,7 & 45,1 & 8,1 & 4,4 & 2,1 & 1,5 & 5,3 & & & \hline \hline \end{array}$$

Рассмотрим разность между этими значениями, и накопления этих отклонений за разные промежутки времени. Результаты представлены в таблице для момента отключения элементов, представленных ветвями 17 и 18, в следующих столбцах – накопление избытков массы через 5, 10 и 20 единиц времени (секунд, минут), которые приняты в расчётах.

**Варианты воздействий и соответствующие им отклики
в ветвях сетевой модели при изменении структуры**

Номера ветвей	Воздействия	Отклики, штатные	Отклики при аварии	Накопление избытка массы, в единицах времени			
				1	5	10	20
1	150	102,1	101,2	-0,9	-4,68	-9,37	-18,74
2	15	13,1	13,0	0,1	0,35	0,69	1,38
3	10	6,4	5,9	0,5	2,58	5,16	10,33
4	14	4,1	2,6	1,5	7,69	15,39	30,77
5	52	0,9	3,1	-2,2	-11,11	-22,23	-44,46
6	20	23,9	24,4	-0,5	-2,44	-4,87	-9,75
7	25	10,5	11,3	-0,8	-3,97	-7,95	-15,90
8	25	4,5	6,6	-2,1	-10,72	-21,44	-42,88
9	10	57,9	58,8	-0,9	-4,68	-9,37	-18,74
10	10	2,5	3,1	-0,6	-3,11	-6,23	-12,46
11	1	21,2	21,1	0,1	0,69	1,38	2,76
12	1	10,7	9,8	0,9	4,66	9,33	18,66
13	1	45,1	45,4	-0,3	-1,75	-3,49	-6,99
14	10	8,1	8,0	0,1	0,35	0,69	1,38
15	8	4,4	3,9	0,5	2,58	5,16	10,33
16	12	2,1	0,6	1,5	7,69	15,39	30,77
17	-6	1,5	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0
18	16	5,3	0,0	5,3	0,0	0,0	0,0

Надо понимать, что разница между значениями потоков для штатного режима и аварийного режимов была рассчитана для потоков за единицу времени. Полученная разность будет накапливаться, и можно рассчитать время, за которое накопленные избыточные массы создадут аварийную ситуацию.

Можно видеть, что в ветвях 4, 12, 16 происходит наибольшее накопление избыточной массы, в сравнении со штатными значениями, следовательно, это и наиболее опасные в аварийном, в пожарном отношении участки.

Можно сделать вывод, что сетевые модели атмосферной ректификационной колонны К-2 позволяют рассчитать параметры процессов при изменении структуры установки, связанной с выходом из строя отдельных элементов, подсистем; ускорить принятие решений для анализа и предотвращения аварийных противопожарных ситуаций на объектах первичной переработки нефти.

Литература

1. *Лебедева М.И.* Об оценке пожарного риска на технологической установке первичной переработки нефти // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. Вып. 4 (50). 2013. 9 с. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
2. *Лебедева М.И., Федоров А.В.* Повышение уровня пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих технологических процессов путем анализа и управления рисками // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2013. № 2. С. 34-37.
3. *Петров А.Е.* Тензорный метод и параллельные вычисления // Научно-технические средства информатизации, автоматизации и интеллектуализации в народном хозяйстве. М.: Знание, 1991. С. 43-54.
4. *Петров А.Е.* Моделирование и анализ поведения сложной системы при чрезвычайной ситуации тензорным методом // Проблемы управления в условиях чрезвычайной ситуации. Звенигород, 1992. С. 2.