УДК 65.011.56

Р.М. Вивчарь, М.Е. Коваленко, Д.С. Дмитриенко,
А.И. Смирнов, С.А. Черкасов, А.И. Зайцев, Р.В. Киричек

Методика анализа и устранения причин нарушений функционирования производства холдинга химической промышленности

Рассмотрена методика анализа и устранения причин нарушений нормального функционирования производства. Основой данной методологии является использование причинных байесовских сетей (БС). Представлена структурно-логическая схема методики, а также основные ее этапы. Приведен алгоритм построения на основе анализа процесса функционирования производства холдинга химической промышленности причинной БС. Представлены рекомендации по реализации методики с целью повышения функционирования производства.
Ключевые слова: эффективность функционирования производства, химическая промышленность, автоматизированная система управления, суперактивные решения, корневые причины.
DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-4-95-103

Эффективность процессов производства минеральных удобрений, вносящих весомый вклад в продовольственную безопасность РФ, в значительной степени зависит от степени их автоматизации. Для повышения эффективности предприятий, выпускающих минеральные удобрения, компания «Цифра» разработала автоматизированную систему управления производством (АСУП). Примером организации, внедрившей данную АСУП, является АО «Апатит», входящее в состав группы «ФосАгро» – одного из ведущих производителей фосфорсодержащих удобрений в России.

Одной из функций разработанной АСУП является поддержка принятия управляющих решений.

Разработанная АСУП предоставляет инструменты для принятия обоснованных управленческих решений. С целью повышения эффективности оперативного управления химическим холдингом предлагается усовершенствовать математическое обеспечение АСУП, интегрировав в него проактивный подход к формированию управленческих решений [1]. Суть данного подхода заключается в заблаговременном выявлении и устранении потенциальных проблем посредством применения проактивных стратегий управления, таких как превентивная, предиктивная и суперактивная [1, 2]. Первые две стратегии направлены на предотвращение нежелательных событий в текущем периоде, а третья – на сокращение частоты их возникновения в дальнейшем, включая их полное исключение, посредством выявления и нейтрализации первопричин.

Исходя из этого, в состав существующего математического обеспечения АСУП должен входить инструментарий, позволяющий обосновывать на основе информации о текущем и прогнозном состоянии производства превентивные, предиктивные и суперактивные решения. Обзор доступных научно-методических материалов показал, что существует значительное количество методик, позволяющих обосновать превентивные и предиктивные решения, которые могут быть успешно интегрированы в математическое обеспечение АСУП химического холдинга.

Однако полностью противоположная ситуация складывается с обоснованием суперактивных решений. В основе обоснования суперактивных решений по управлению производством холдинга химической промышленности лежит анализ корневых причин негативных событий. Под корневыми причинами понимаются события, инициирующие цепочку причинно-следственных зависимостей, которые в конечном итоге приводят к появлению негативного события.

Все существующие методы анализа причинно-следственных связей в зависимости от наличия неопределённости в рассматриваемых процессах подразделяются на детерминированные и стохастические.

К детерминированным методам, основанным на элементах логики разных порядков, относят:

– методы, основанные на логике первого порядка (first order logic);

– методы, основанные на парадигме ALP (abductive logic programming);

– деревья отказов (fault tree);

– методы, основанные на пропозициональной логике.

Среди детерминированных методов, использующихся для классификации причин, выделят искусственные нейронные сети, деревья решений, метод опорных векторов (SVM). К детерминированным методам исследования причинно-следственных связей, основанных на процессных моделях, относятся автоматы и сети Петри.

Стохастические методы можно разделить на три группы:

– основанные на логике различных порядков;

– байесовские;

– основанные на процессных моделях.

К первой группе относятся методы, основанные на неаксиоматической, нечеткой или вероятностной логике, на теории Демпстера–Шафера, а также нечеткие деревья отказов.

Среди второй группы выделяют байесовские сети и динамические байесовские сети, марковские логические сети, методы, основанные на PRM

(probabilistic relational model) и скрытых марковских моделях, Sum-product сети и Relational sum-product сети. При этом марковские логические сети и методы, основанные на скрытых Марковских моделях, также могут быть отнесены и к первой с третьей группой соответственно.

К стохастическим методам исследования причинно-следственных связей, основанных на процессных моделях, относят стохастические сети Петри и искусственные нейронные сети.

Использование детерминированных методов для анализа корневых причин негативных событий, возникающих в процессе функционирования производства минеральных удобрений, не представляется возможным вследствие наличия факторов неопределенности. Это обусловливает необходимость использования для этой задачи стохастических методов.

Вопросам выявления и анализа корневых причин появления различных негативных событий с учетом влияния факторов неопределённости посвящены работы [3–12]. Однако представленные в данных работах методы по своей сути являются инструментом качественно-экспертного анализа и не позволяют учитывать статистическую информацию о возникавших в прошлом обстоятельствах.

Вклад в исследование методик анализа причин неисправностей и сбоев внесли [13–18]. Представленные в этих трудах подходы, в отличие от методов анализа первопричин, обладают большей объективностью и позволяют численно оценить взаимосвязи между причинами и следствиями.

Однако их применение подразумевает более высокую компетентность исследователя и обычно ограничивается анализом отказов, не охватывая другие виды нежелательных происшествий.

Использование для анализа корневых причин искусственных нейронных сетей позволяет только диагностировать предсказанную корневую причину, но не объясняет логику этого процесса, что не позволяет в дальнейшем выработать суперактивные решения, направленные на ее ликвидацию.

В этой связи наиболее целесообразным является использование в качестве научно-методического аппарата выявления и анализа корневых причин нарушений функционирования производства минеральных удобрений байесовских методов.

Целью настоящей статьи является представление новой методики анализа и устранения причин нарушений функционирования производства, лишенной указанных выше недостатков. В основе методики положен аппарат причинных байесовых сетей (БС). Использование причинных БС позволит:

– учесть в процессе анализа причин негативных событий разнородные данные о процессе функционирования производства (экспертные и статистические) и их неопределенность;

– формально представить решения по устранению причин негативных событий, количественно оценить их качество и, следовательно, выбрать наиболее оптимальное;

– существенно снизить долю субъективизма в процессе выявления и устранения причин негативных событий за счет того, что в основе причинных БС лежит строгий аппарат теории вероятностей, графов, а также статистики.

Включение предлагаемой методики в состав математического обеспечения АСУП холдинга химической промышленности позволит повысить эффективность функционирования этой системы и, как следствие, эффективность всего производства в целом.

Описание основных этапов методики

Фундаментом предлагаемой методики является разработанная на основе анализа процесса функционирования производства АО «Апатит» причинная БС. Алгоритм построения БС представлен на рис. 1.

Алгоритм построения причинной БС-сети включает в себя три последовательных этапа:

1. Построение предварительной структуры причинно-следственных связей на основе анализа возможных нарушений функционирования производства (шаги 1–7).

На *шаге 1* происходит определение множества **E** нарушений функционирования производства (НФП) холдинга химической промышленности. Исходными данными для выполнения этого шага выступают как возможные НФП, получаемые экспертным опросом, так и имевшие в прошлом нарушения, информация о которых собирается модулем АСУП «Отслеживание и генеалогия продукции». Сервисы модуля «Отслеживание и генеалогия продукции» предоставляют следующие возможности для анализа причин НФП, такие как:

А. Просмотр истории партии доступен в виде таблицы или наглядной графической схемы (древовидная диаграмма), на которой в графическом виде изображены связи выбранной партии с другими партиями (предшествующие и следующие за исследуемой). При необходимости также схематически отображается полная цепочка производства.

Б. Функционал генеалогии позволяет формировать отчетную форму с историей производства партии продукции. Отчетная форма по генеалогии партии продукции содержит:

– набор технологических операций, выполненных для выпуска партии готовой продукции;

– основные параметры технологических операций;

– набор связанных партий сырья, материала используемых или потребленных для выпуска партии готовой продукции.

В. Просмотр свойств и параметров партий. Поиск партий возможен по стандартным атрибутам партии, которые поддерживают сервисы платформы АСУП (период создания партии, номер, код, место последнего положения, материал, статус, идентификатор партии). Функционал генеалогии позволяет осуществлять движение по истории партий (вверх/вниз), т.е. переход от выбранной партии к предыдущей или следующей партии и обратно.

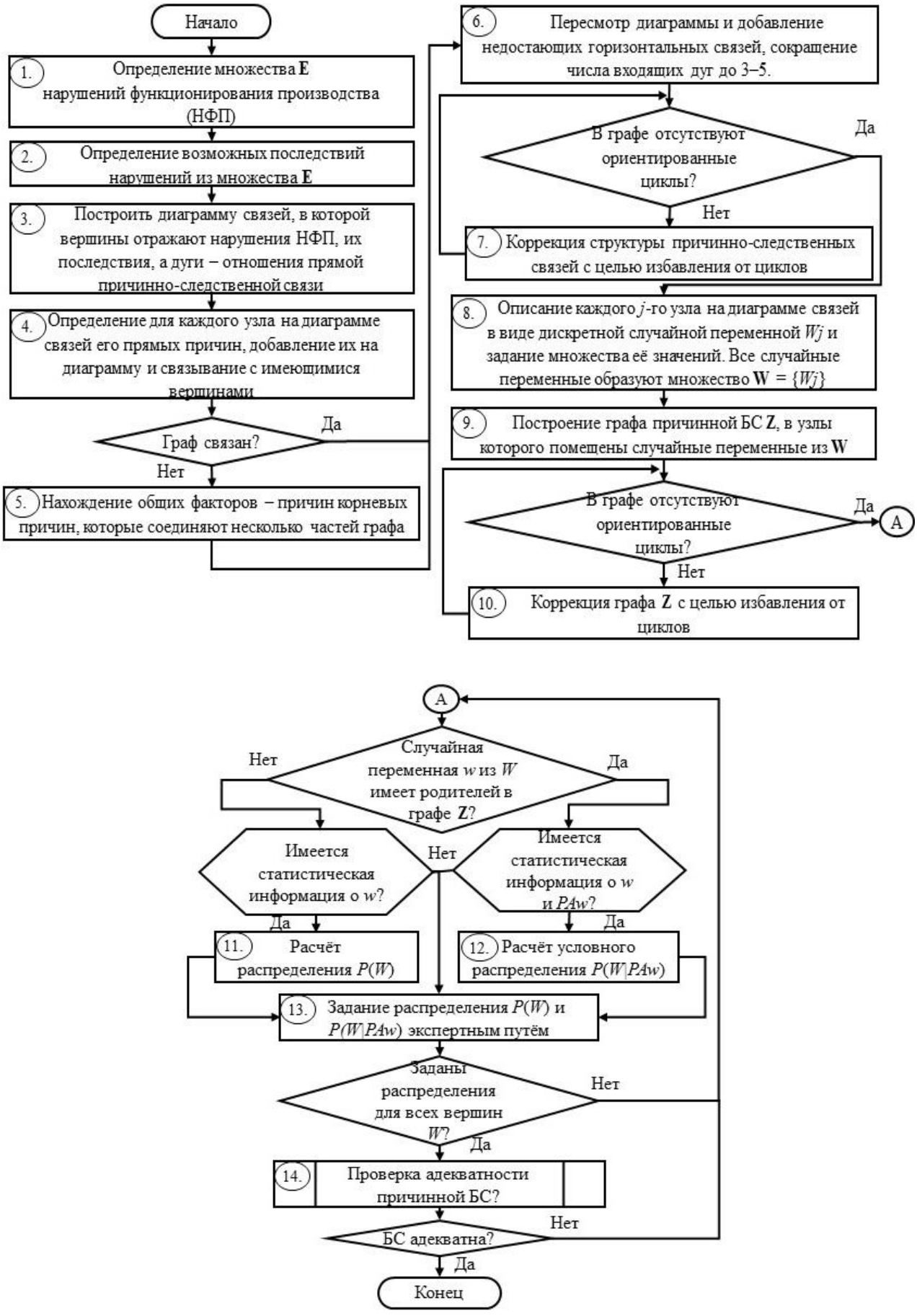


Рис. 1. Алгоритм построения причинной БС

Г. Просмотр истории операции, которые выполнялись с партией. История производства по заданной партии отражает:

– параметры технологических операций, которые были выполнены для выпуска продукции;

– историю использования материалов, сырья, полуфабрикатов для выпуска партии продукции;

– данные по качеству сырья, материалов, полуфабрикатов, продукции на всех производственных этапах;

– отклонения от требований к технологическому процессу.

Д. Просмотр трендов технологических параметров.

Е. Просмотр свойств операций, которые выполнялись с партией.

Ж. Просмотр ресурсов (технологическое оборудование, сырье и т.д.), задействованных в операциях, которые выполнялись с партией.

На *шаге 2* для каждого НФП $e_i, i = \overline{1, I}$ определяются последствия его наступления. Для этого используются данные, собираемые модулями АСУП «Анализ эффективности производства» и «Отслеживание и генеалогия продукции», а также привлекаемые на шаге 1 эксперты;

Шаги 3 и 4 подразумевают создание диаграммы связей, где узлами выступают НФП и их последствия, а дуги отображают причинно-следственные зависимости. Для каждого элемента диаграммы требуется выявить первопричины, интегрировать их в диаграмму и установить соответствующие связи.

При этом имеют место следующие виды причинно-следственных связей:

– прямая причина (обстоятельство *А* непосредственно приводит к возникновению обстоятельства *Б*, при этом появление *А* достаточно для появления обстоятельства *Б*) или несколько прямых причин (обстоятельства $A_1, A_2, \ldots$ непосредственно приводит к возникновению обстоятельства *Б*. Для гарантированного появления *Б* необходимо появление всех обстоятельств $A_1, A_2, \ldots$);

– несколько альтернативах причин (обстоятельство *Б* может появиться как при возникновении только обстоятельства A_1, так и при возникновении только A_2);

– комбинация прямых и альтернативных причин.

Если в результате построения диаграммы связей был получен несвязный граф, необходимо попытаться найти связи, которые могут соединять корневые причины двух частей графа (*шаг 5*). В случае если сделать этого не удается, необходимо в дальнейшем рассматривать каждую часть несвязного графа как отдельный причинный граф.

На *шаге 6* необходимо пересмотреть созданную ранее диаграмму связей. Цель этого пересмотра – добавление отсутствующих горизонтальных связей и, по возможности, уменьшение количества входящих связей (дуг) к каждой вершине до трех. Эти действия предпринимаются для упрощения вычислительных процессов в последующих задачах.

Затем полученная диаграмма подвергается проверке на предмет наличия замкнутых направленных контуров (ориентированных циклов обратной связи).

Если в полученном графе присутствуют ориентированные циклы, то такой граф подлежит коррекции с целью избавления от циклов (*шаг 7*). Необходимость избавления от циклов в структуре диаграммы связей обусловлена ограничениями математического аппарата байесовых сетей.

2. Построение графа причинной БС (шаги 8–10).

На *шаге 8* каждый *i*-й узел на полученной ранее диаграмме связей представляется как дискретная случайная переменная W_i, для которой задается определенный набор возможных значений.

Анализ работы химического холдинга показал, что для описания узлов в этой диаграмме связей целесообразно применять следующие типы переменных:

– булева переменная с двумя значениями: 1 (истина), 0 (ложь);

– многозначная переменная, принимающая одно значение из ограниченного набора несовместных событий. Примером может служить температура сырья в химической реакции: {низкая, средняя, высокая};

– числовая переменная, принимающая значения из конечного набора целых или вещественных чисел;

– интервальная переменная, значениями которой являются непересекающиеся числовые интервалы.

Весь набор переменных, описывающих узлы на диаграмме связей, формируют общее множество $\mathbf{W} = \{W_j\}_J$.

На *шаге 9* создается граф причинной БС **Z**, где узлами служат случайные переменные из множества **W**. Пара вершин W_j и W_{j-m} соединяется дугой ($W_{j-m} \to W_j$) только, если W_{j-m} является прямой причиной W_j, согласно диаграмме связей.

При построении графа причинной БС могут использоваться следующие типы связей:

– декомпозиция многозначной случайной переменной;

– одна прямая причина без неопределенности;

– одна прямая причина с неопределенностью;

– несколько прямых причин без неопределенности;

– несколько прямых причин с неопределенностью;

– альтернативные причины.

После завершения шага 9 граф причинной БС так же, как и ранее, подвергается проверке на наличие ориентированных циклов. В случае отсутствия таких циклов построение графа причинной БС завершается, в противном случае его структура подлежит коррекции на шаге 10.

3. Определение априорных условных и маргинальных вероятностных распределений.

На *шаге 11* проводится определение вероятностного распределения над множеством значений каждой переменной *W*, не имеющих родителей в графе **Z**, в случае если имеется статистическая информация об этой переменной. Для этого может быть использовано выражение

$$P\left(W_j = w_j\right) = \frac{N_{w_j}}{N}, \qquad (1)$$

где w_j – одно из значений переменной W_j, N_{w_j} – число исходов, при которых наблюдалось событие $\left\{W_j = w_j\right\}$, N – общее число исходов.

Выполнение *шага 12* методики заключается в нахождении условного вероятностного распределения над множеством значений $W_j \in \mathbf{W}$, для которых имеются родители в графе **Z**, для аналогичного случая. Определение условного вероятностного распределения производится в соответствии с выражением

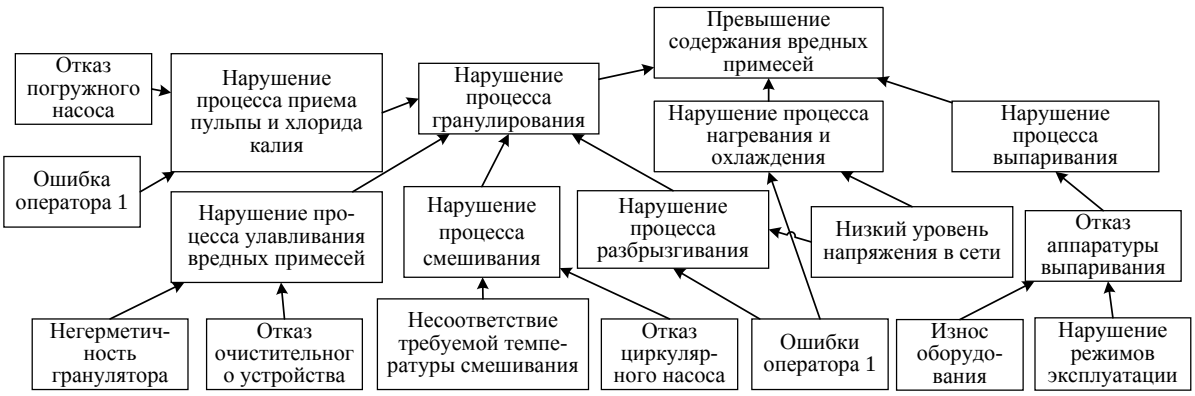
$$P\left(W_j = w_j \middle| PA_{w_j} = pa\right) = \frac{N_{w_j pa}}{N_{pa}}, \qquad (2)$$

где pa – одна из возможных конфигураций множества $\mathbf{PA_W}$, $N_{w_j pa}$ – число исходов, при которых наблюдалось событие $\left\{W_j = w_j\right\} \wedge \left\{PA_{wj} = pa\right\}$, N_{pa} – число исходов, при которых наблюдалось событие $\left\{PA_{wj} = pa\right\}$.

В случае отсутствия статистической информации о переменных причинной БС **Z** вероятностные и условные вероятностные распределения определяются с помощью экспертных методов путем присваивания переменной одного из стандартных распределений (*шаг 13*).

На *шаге 14* оценивается адекватность разработанной причинной БС. Если разработанная БС адекватна, то процесс ее создания завершается, в противном случае процесс определения вероятностных распределений подлежит коррекции.

На рис. 2 представлен подграф причинной БС, разработанной по представленному алгоритму, для производства холдинга химической промышленности.



Негерметичность гранулятора	0		1	
Отказ очистительного устройства	0	1	0	1
Нарушение процесса улавливания вредных примесей	0,5	0,5	0,5	0,5

Нарушение процесса гранулирования	0				1			
Нарушение процесса нагревания и охлаждения	0		1		0		1	
Нарушение процесса выпаривания	0	1	0	1	0	1	0	1
Превышение содержания вредных примесей	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Негерметичность погружного насоса	0		1	
Ошибки оператора 1	0	1	0	1
Нарушение процесса приема плава пульпы	0,0	0,9	0,75	1,0

Нарушение процесса улавливания вредных примесей	0								1							
Нарушение приема плава пульпы и хлорида калия	0				1				0				1			
Нарушение процесса смешивания	0		1		0		1		0		1		0		1	
Нарушение процесса разбрызгивания	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Нарушение процесса гранулирования	0,0	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9	0,9	0,9	0,1	1,0	1,0	1,0

Низкий уровень напряжения в сети	0,03
Несоответствие требуемой температуры смешивания	0,08
Ошибки оператора 2	0,1
Отказ циркуляционного насоса	0,01
Ошибки оператора 1	0,15
Отказ погружного насоса	0,1
Отказ очистительного устройства	0,1
Негерметичность гранулятора	0,15

Отказ циркуляционного насоса	0		1	
Несоответствие требуемой температуры смешивания	0	1	0	1
Нарушение процесса смешивания	0,7	0,9	0,7	0,95

Низкий уровень напряжения в сети	0		1	
Ошибки оператора 2	0	1	0	1
Нарушение процесса разбрызгивания	0,0	1,0	0,6	1,0

Рис. 2. Подграф причинной БС для производства гранулированного карбамида

Представленный подграф позволяет анализировать корневые причины превышения вредных примесей при производстве гранулированного карбамида.

Разработанная с помощью представленного алгоритма причинная БС **Z** выступает в качестве исходных данных для методики анализа и устранения корневых причин НФП холдинга химической промышленности, структурно-логическая схема которой представлена на рис. 3.

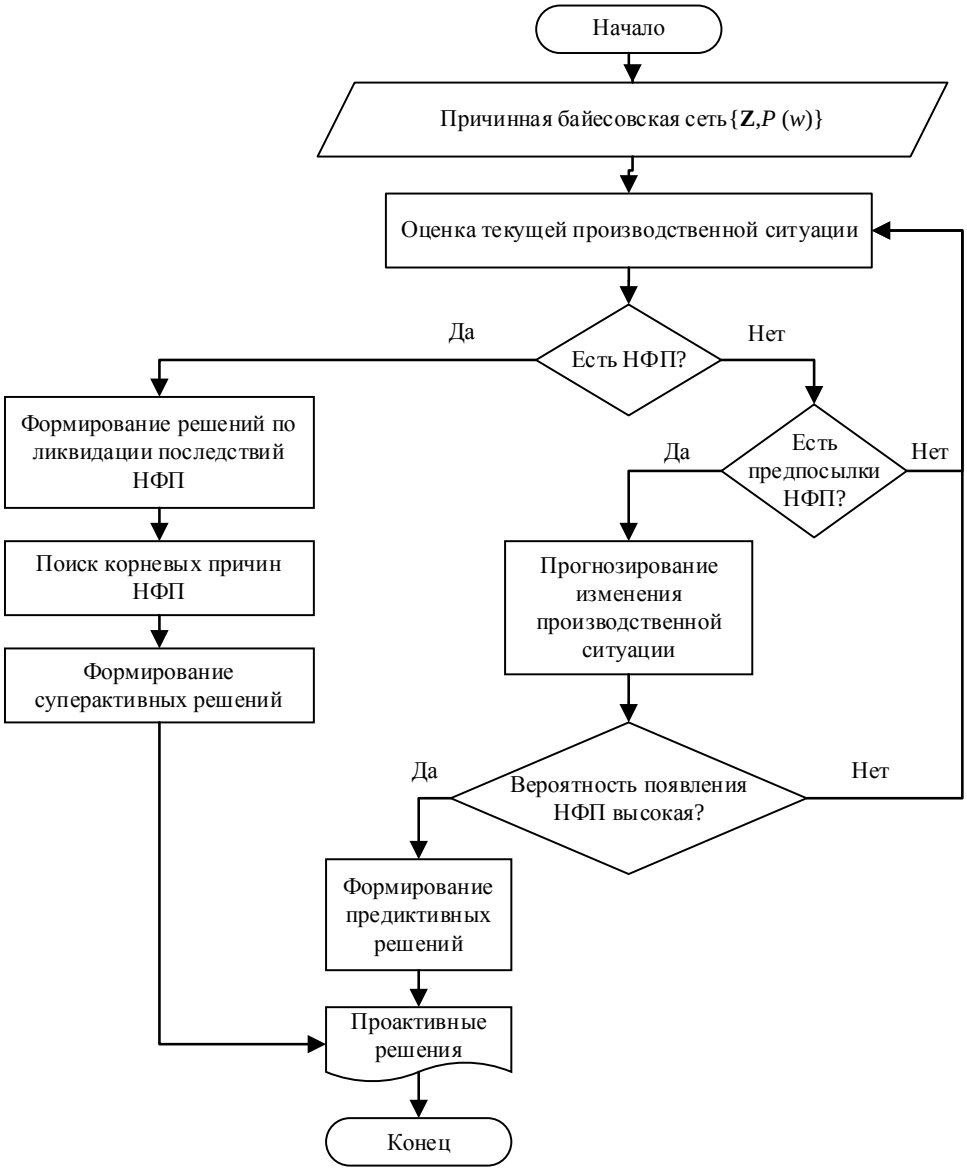


Рис. 3. Структурно-логическая схема методики анализа и устранения корневых причин НФП холдинга химической промышленности

Первым этапом методики является анализ текущей производственной ситуации. Информация для анализа текущей производственной ситуации предоставляется специально разработанными модулями АСУП. К числу таких модулей относятся:

– модуль контроля производственных процессов;

– модуль контроля состояния и распределения ресурсов, а также состояния используемого оборудования;

– модуль управления персоналом;

– модуль управления безопасностью.

Данные модули включают в себя источники данных (теги) телеметрии (сигналы оборудования и датчиков, получаемые с АСУТП, SCADA; расчетные теги; теги ручного ввода; плановые теги; теги из любых внешних систем, интегрируемых через ETL) производственных процессов, а также соответствующие аппаратные (АРМ, серверы и т.д.) и программные компоненты (программное обеспечение).

Если в результате оценки текущей производственной ситуации, полученной в результате контроля, определяется факт наличия НФП, то в первую очередь происходит обоснование решений по ликвидации последствий этого нарушения. После этого все внимание переключается на поиск корневых причин появления такого нарушения, результаты которого будут являться основой для формирования суперактивных решений, целью которых является исключение такого нарушения в будущем, что позволит повысить эффективность производства. Данная задача

решается обратным выводом на разработанной ранее причинной байесовской сети и заключается в определении апостериорных вероятностей для каждой корневой причины в соответствии с выражением

$$P(x \mid e') = \frac{\sum_{v_3} P(x, e', v_3)}{\sum_{x, v_3} P(x, e', v_3)}, \quad (3)$$

где e' – наблюдаемая конфигурация множества НФП $\mathbf{E}'$, x – конфигурация множества корневых причин НФП $\mathbf{X}$, v_3 – конфигурация множества $\mathbf{V_3}$ случайных переменных на байесовской причинной сети, $\mathbf{V_3} = \mathbf{W} \setminus (\mathbf{X} \cup \mathbf{E}')$.

Суперактивные решения по управлению производством должны быть направлены на исключение причин с наибольшем значением вероятности (3).

Если в процессе анализа текущей производственной ситуации не фиксируются НФП, однако имеются предпосылки для этого, заключающиеся в появлении одной или нескольких причин НФП, то производится прогнозирование изменения производственной ситуации.

Прогнозирование изменения производственной ситуации осуществляется с помощью причинной байесовской сети и заключается в вычислении апостериорных вероятностей появления НФП в соответствии с выражением

$$P(e \mid a') = \frac{\sum_{v_4} P(e, a', v_4)}{\sum_{e, v_4} P(e, a', v_4)}, \quad (4)$$

где e – конфигурация множества НФП $\mathbf{E}$, a' – наблюдаемая конфигурация множества причин НФП $\mathbf{A}'$, v_4 – конфигурация множества $\mathbf{V}_4$ случайных переменных на байесовской причинной сети, $\mathbf{V}_4 = \mathbf{W} \setminus (\mathbf{E} \cup \mathbf{A}')$.

После этого для каждого возможного НФП $e_i, i = \overline{1, I}$ проверяется условие

$$P(e_i \mid a') \le P_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{пр}}$ – приемлемая вероятность появления НФП, выступающая в качестве показателя риска достижения его целей и определяемая с помощью экспертов.

Если для каких-либо НФП условие (5) не выполняется, то следующим шагом методики является формирование превентивных решений, направленных на упреждение появления этих нарушений. Исходной информацией для формирования таких решений являются причины появления прогнозируемых НФП, которые могут быть определены с помощью выражения (3).

Представленная методика отличается от известных учетом разнородных данных в процессе анализа и устранения причин нарушений НФП химической промышленности, что позволяет повысить качество диагностирования и прогнозирования этих причин и, следовательно, повысить качество управляющих решений, направленных на их устранение.

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана методология анализа и устранения причин НФП. Основой данной методологии является использование причинных БС, которое позволило:

– учесть в процессе анализа причин НФП холдинга химической промышленности разнородные данные о процессе функционирования производства (экспертные и статистические) и их неопределенность;

– формально представить решения по устранению причин НФП, количественно оценить их качество и, следовательно, выбрать наиболее оптимальное;

– существенно снизить долю субъективизма в процессе выявления и устранения причин НФП за счет того, что в основе причинных БС лежит строгий аппарат теории вероятностей, графов, а также статистики.

Реализация представленной методики в АСУП холдинга химической промышленности позволит усовершенствовать существующее математическое обеспечение этой системы с точки зрения придания этой системе проактивной функции, что обеспечит существенное повышение эффективности производства минеральных удобрений, заключающееся в снижении нормы потерь производства продукции; оптимизации использования производственных ресурсов на ведение технологического процесса; своевременном выявлении брака; снижении числа аварийных ситуаций за счет раннего выявления предпосылок, своевременного реагирования на них и повышения осведомленности персонала о действиях во внештатных ситуациях (сокращение внепланового простоя); повышении эффективности деятельности персонала.

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Апатит» в рамках НИР «Исследование и разработка моделей и методов для повышения эффективности работы АСУП предприятий химической промышленности» № АПТ-390000091.

Литература

1. Вивчарь Р.М. Концепция проактивного управления производством холдинга химической промышленности / Р.М. Вивчарь, И.В. Друзин, Р.В. Киричек, А.И. Смирнов, С.А. Черкасов // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 9 [Электронный ресурс]. – URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10404 (дата обращения: 21.12.2025).

2. Вивчарь Р.М. Концептуальная модель проактивного управления производством непрерывного типа / Р.М. Вивчарь, Ю.М. Гурьев, А.Ю. Ташкинов, А.И. Смирнов, С.А. Черкасов, Р.В. Киричек // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 5. – С. 13–17.

3. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг; пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 370 с.

4. Juran J.M. Juran's quality handbook / J.M. Juran, A. Blanton Godfrey. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 1730 p.

5. Авершин А.А. Методы анализа травматизма (метод корневых причин, метод 5 почему, диаграмма Исикавы) / А.А. Авершин, В.В. Тугай, А.В. Джумский, А.М. Иваненко // Вестник Луганского гос. ун-та им. В. Даля. – 2021. – № 10 (52). – С. 9–14.

6. Andersen B. Root cause analysis: simplified tools and techniques / B. Andersen, T. Fagerhaug. – Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality, Quality Press, 2006. – 240 p.

7. Шарапова А.Г. Причины выявления несоответствий при анализе протоколов // Контроль качества продукции. – 2022. – № 10. – С. 36–39.

8. Васецкая Н.О. Управление несоответствием и корректирующие действия при создании научно-технической продукции // Наука и бизнес. Пути развития. – 2022. – № 8 (134). – С. 118–121.

9. Мельчакова А.И. Методы анализа корневых причин несоответствий при производстве / А.И. Мельчакова, М.О. Мажанов, Е.В. Иевкова // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник трудов 11-й Междунар. науч. конф. – Казань: КОНВЕРТ, 2020. – С. 89–91.

10. Рыбкина И.А. Анализ несоответствий (дефектов), выявленных в процессе изготовления продукции // Синергия наук. – 2020. – № 48. – С. 328–333.

11. Демидько Е.В. Теоретические подходы к анализу причин изменения прибыли предприятия // Управленческий учет. – 2023. – № 6. – С. 164–169.

12. Аскаров Е.С. Причина и следствие в теории достижения нормативного качества // Методы менеджмента качества. – 2010. – № 5. – С. 34–38.

13. Машиностроение. Энциклопедия. Надежность машин. Т.IV-3 / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 592 с.

14. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

15. Watson H.A. Launch control safety study. Bell Telephone Laboratories, Murray Hill. – NJ: Tech. Rep., 1961.

16. Ericson C.A. Fault Tree analysis // Proceedings of the 17th International System Safety Conference. – Orlando, Florida, 1999. – Vol. 1. – P. 1–9.

17. Stier R. Happy 50th birthday to HACCP: retrospective and prospective / R. Stier, W. H. Sperber // Food safety magazine. – 2009. – P. 42–46.

18. Кузьмин А.М. Методика Кепнера–Трего / А.М. Кузьмин, Е.А. Высоковская // Методы менеджмента качества. – 2020. – № 8. – С. 35.

Вивчарь Роман Михайлович
Канд. техн. наук, доцент каф. программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)
Большевиков пр-т, 22 к.1, г. Санкт-Петербург, Россия, 193232
ORCID: 0000-0003-3865-9102
Тел.: +7-981-686-99-46
Эл. почта: vivchar.rm@sut.ru

Коваленко Михаил Евгеньевич
Рук. отд. разработки и поставки решений ООО «Цифра»
Вернадского пр-т, 6, г. Москва, Россия, 119311
Тел.: +7 (495-1) 28-54-80
Эл. почта: Mikhail.Kovalenko@zyfra.com

Дмитриенко Дмитрий Сергеевич
Директор проектов ООО «Цифра»
Вернадского пр-т, 6, г. Москва, Россия, 119311
Тел.: +7 (495-1) 28-54-80
Эл. почта: Dmitriy.Dmitrienko@zyfra.com

Смирнов Алексей Игоревич
Канд. экон. наук, доцент, директор Дирекции по экономической безопасности АО «Апатит»
Северное ш., 75, г. Череповец, Россия, 162625
Тел.: +7-820-259-24-09
Эл. почта: ASmirnov4@phosagro.ru

Черкасов Сергей Александрович
Зам. дир. по экономической безопасности АО «Апатит»
Северное ш., 75, г. Череповец, Россия, 162625
Тел.: +7-820-259-24-09
Эл. почта: SCherkasov@phosagro.ru

Зайцев Алексей Иванович
Проректор по цифровой трансформации и административной работе СПбГУТ
Большевиков пр-т, 22 к.1, Санкт-Петербург, Россия, 193232
Тел.: +7 (812-3) 05-12-26
Эл. почта: cio@sut.ru

Киричек Руслан Валентинович
Д-р техн. наук, проф., ректор СПбГУТ
Большевиков пр-т, 22 к.1, Санкт-Петербург, Россия, 193232
ORCID: 0000-0002-8781-6840
Тел.: +7 (812-3) 05-12-00
Эл. почта: kirichek@sut.ru

Поступила в редакцию: 20.08.2025.
Принята к публикации: 21.01.2026.

Vivchar R.M., Guryev Yu.M., Kovalenko M.E., Dmitrienko D.S., Smirnov A.I., Cherkasov S.A., Zaitsev A.I., Kirichek R.V.

Methodology for analyzing and eliminating the causes of operational disruptions in a chemical industry holding

The paper considers a methodology for analyzing and mitigating the root causes of operational disruptions in production processes. The core of this methodology is the use of causal Bayesian networks (CBNs). The structural and logical framework of the methodology is presented, as well as its main stages. An algorithm is provided for constructing a CBN based on the analysis of production processes within a chemical industry holding. The paper offers recommendations for implementing the methodology to enhance production performance.

Keywords: production efficiency, chemical industry, automated control system, super-active solutions, root causes.
DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-4-95-103

References

1. Vivchar R.M., Druzin I.V., Kirichek R.V., Smirnov A.I., Cherkasov S.A. [The concept of proactive production management of the chemical industry holding]. *Engineering Journal of Don*, 2025, vol. 9 (in Russ.). Available at: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10404 (Accessed: 21 December 2025).

2. Vivchar R.M., Guryev Yu.M., Tashkinov A.Yu., Smirnov A.I. Cherkasov, S.A., Kirichek R.V. [A conceptual model of proactive continuous production management]. *Automation in industry*, 2025, no. 5, pp. 13–17 (in Russ.).

3. Deming E. *Vyhod iz krizisa: Novaya paradigma upravleniya l'udmi, sistemami I protsessami* [Out of the crisis: A new

paradigm of managing people, systems and processes]. Moscow, Alpina Business Books, 2007, 370 p. (in Russ.).

4. Juran J.M., Blanton Godfrey A. Juran's quality handbook. 5th Ed. New York, McGraw-Hill, 1998, 1730 p.

5. Avershin, A.A., Tugai V.V., Dzhumsky A.V., Ivanenko A.M. *Metody analiza travmotizma (metod kornevykh prichin, metod 5 pochemu, diagramma Isikavy* [Injury analysis methods (root cause method, 5 why method, Ishikawa diagram]. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya*, 2021, no. 10, vol. 52, pp. 9–14 (in Russ.).

6. Andersen V., Fagerhaug T. Root cause analysis: simplified tools and techniques. Milwaukee, Wisconsin, American Society for Quality, Quality Press, 2006, 240 p.

7. Sharapova A.G. [Reasons for identifying inconsistencies in the analysis of protocols]. *Product quality control*, 2022, no. 10, pp. 36–39 (in Russ.).

8. Vasetskaya N.O. *Upravlenie nesootvetstviem i korrektiruyuchshie deystviya pri sozdanii nauchno-tehnicheskoy produktsii* [Management of inconsistencies and corrective actions in the creation of scientific and technical products]. *Science and business: development ways*, 2022, no. 8, vol. 134, pp. 118–121 (in Russ.).

9. Melchakova A.I., Mazhanov M.O., Ievkova E.V. *Metody analiza kornevykh prichin nesootvetstviy na proizvodstve* [Methods for analyzing the root causes of nonconformities in production]. Prioritetnie napravleniya innovacionnoy deyatelnosti v promishlennosti. Sbornik trudov 11 megdunarodnoi nauchnoi konferencii [*Priority areas of innovation in industry*. Proceedings of the 11th International Scientific Conference], 2020. pp. 89–91 (in Russ.).

10. Rybkina I.A. [Analysis of non-conformities (defects) identified in the production process]. *Sinergiya nauk*, 2020, no. 48, pp. 328–333 (in Russ.).

11. Demidko E.V. [Theoretical approaches to the analysis of the causes of changes in the profit of the enterprise]. *Management Accounting*, 2023, no. 6, pp. 164–169 (in Russ.).

12. Askarov E.S. *Prichina I sledstviye v teorii dostigeniya normativnogo kachestva* [Cause and effect in the theory of achieving normative quality]. *Methods of Quality Management*, 2010, no. 5. pp. 34–38 (in Russ.).

13. Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Nadegnost mashin.T.IV-3* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Reliability of machines. T.IV-3]. Moscow, Mechanical engineering, 2003, 592 p. (in Russ.).

14. Birger I.A. *Tehnicgeskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, Mechanical engineering, 1978. 240 p. (in Russ.).

15. Watson H.A. Launch control safety study. Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, NJ, Tech. Rep, 1961.

16. Ericson C. A., Ll C. Fault Tree analysis. *Proceedings of the 17th International System Safety Conference, Orlando, Florida*, 1999, vol. 1, pp. 1–9.

17. Stier R., Sperber W. H. Happy 50th birthday to HACCP: retrospective and prospective. *Food safety magazine*, 2009. pp. 42–46.

18. Kuzmin A.M., Vysokovskaya E.A. *Metodika Kepnera-Trego* [The Kepner-Trego Meyhodology]. *Methods of Quality Management*, 2011, no. 7. pp. 35 (in Russ.).

Roman M. Vivchar
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Software Engineering and Computer Engineering, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruevich (SPbSUT)
22, bldg. 1, Bolshevikov pr., St. Petersburg, Russia, 193232
ORCID: 0000-0003-3865-9102
Phone: +7-981-686-99-46
Email: vivchar.rm@sut.ru

Mikhail E. Kovalenko
Head of Solution Development and Delivery Department, Tsifra LLC
6, Vernadsky pr., Moscow, Russia, 119311
Phone:+7 (495) 128-54-80
Email: Mikhail.Kovalenko@zyfra.com

Dmitriy S. Dmitrienko
Project Director, Tsifra LLC
6, Vernadsky pr., Moscow, Russia, 119311
Phone: +7 (495) 128-54-80
Email: Dmitriy.Dmitrienko@zyfra.com

Aleksey I. Smirnov
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Director, Economic Security Directorate of JSC Apatit
75, Severnoye shosse, Cherepovets, Russia, 162625
Phone: +7-820-259-24-09
Email: ASmirnov4@phosagro.ru

Sergey A. Cherkasov
Deputy Director for Economic Security of JSC Apatit
75, Severnoye shosse, Cherepovets, Russia, 162625
Phone: +7-820-259-24-09
Email: SCherkasov@phosagro.ru

Aleksey I. Zaitsev
Vice-Rector for Digital Transformation and Administrative Work, SPbSUT
22, bldg. 1, Bolshevikov pr., St. Petersburg, Russia, 193232
Phone: +7 (812-3) 05-12-26
Email: cio@sut.ru

Ruslan V. Kirichek
Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, SPbSUT
22, bldg. 1, Bolshevikov pr., St. Petersburg, Russia, 193232
ORCID: 0000-0002-8781-6840
Phone: +7 (812-3) 05-12-00
Email: kirichek@sut.ru

Received: 20.08.2025
Accepted: 21.01.2026