

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВС

Хрулев А. Э.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международное моторное бюро

**Аннотация.** Несмотря на успехи в исследованиях и разработке конструкций турбокомпрессоров наддува двигателей внутреннего сгорания, к настоящему времени не создано надежных методик для определения причин их отказов, а применение известных методик на практике требует настолько большой трудоемкости, что фактически неэффективно. В исследовании показано, что причины неисправности турбокомпрессоров наддува ДВС могут определяться логико-вероятностными методами, в том числе, на основе анализа дерева отказов, с привлечением опыта исследования неисправностей турбокомпрессоров. С этой целью было разработано модифицированное (перевернутое) дерево отказов, позволяющее выполнять логический анализ в обратном по отношению к общепринятому направлению – от события отказа системы к базисным событиям, инициирующим отказ. Проверка предлагаемой методики на реальных случаях отказов показала, что определение причины отказа может быть сделано с достаточной для практики достоверностью при минимальных затратах времени.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, турбокомпрессор, неисправность, отказ, причина.

### Введение

Значительные успехи, достигнутые в исследованиях и конструировании турбокомпрессоров для наддува ДВС за все время развития двигателей этого типа [1, 2], не позволяют, тем не менее, говорить о высокой надежности этих агрегатов. Турбокомпрессор по-прежнему, как и десятилетия назад, остается неким "узким" местом двигателя, причем в эксплуатации встречается большое количество случаев неисправностей и отказов, вызванных не только самой эксплуатацией и ошибками в обслуживании двигателя, но и производственными дефектами [3]. То есть, даже при значительных усилиях, направленных на исследования, разработки новых конструкций и производственных технологий, современные турбокомпрессоры наддува ДВС имеют достаточно высокую повреждаемость, в них возможно возникновение неисправностей и отказов, для эффективного устранения которых требуется правильное определение их причин.

Однако именно с проблемой правильного определения причин неисправностей и отказов турбокомпрессоров в эксплуатации вынуждены сталкиваться ремонтные организации, автотранспортные предприятия и владельцы транспортных средств. В прошлые годы турбокомпрессоры по конструкции

представляли собой достаточно простые и недорогие агрегаты с механическим регулированием (перепускными клапанами типа Wastegate, открывавшими байпасный канал мимо турбины), имевшие сравнительно невысокую стоимость [4, 5]. Такой агрегат (рис. 1), в случае ошибочного определения причины неисправности, при повторном выходе из строя мог быть не только вновь заменен без значительных затрат, но даже и отремонтирован. Вследствие чего определению причины неисправности турбокомпрессоров не уделялось большого внимания.



Рис. 1. Схема с механическим регулированием перепускным клапаном типа Wastegate

Дальнейшее ужесточение требований экологии привело к появлению сложных систем турбонаддува [5, 6]: с изменяемой геометрией, в том числе, с управляемыми поворотными лопатками соплового аппарата турбины (VNT – Variable Nozzle Turbo) и

регулируемым компрессором (Variable Geometry Compressor). Этот процесс сопровождался "обрастанием" агрегата дополнительными механическими элементами и электронными системами управления, а стремление конструкторов устранить запаздывание турбокомпрессора при изменении режима работы ДВС ("турбояму") потребовало не только уменьшения габаритов вместе со значительным ростом частоты вращения ротора, но и создания 2-ступенчатых агрегатов, а также турбокомпрессоров с электрическим усилителем (Electric Boosting).

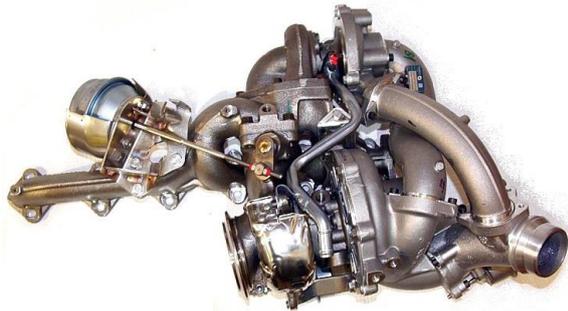


Рис. 2. Система наддува ДВС

Все это не только превратило современный турбокомпрессор в сложную и дорогую систему наддува (рис. 2), практически не предполагающую, даже в случае выхода из строя одного из ее элементов, никакого ремонта, кроме замены агрегата в сборе, но и потребовало специальной подготовки персонала эксплуатирующих, ремонтных и снабженческих служб. В такой ситуации роль методик, позволяющих правильно устанавливать причины неисправностей турбокомпрессоров, заметно возрасла, поскольку попытки "по старинке" отремонтировать отказавший турбокомпрессор его простой заменой без точного установления причины отказа нередко вызывают совершенно непропорциональное увеличение затрат на повторную замену.

#### Анализ публикаций

Анализ опубликованных источников показывает, что известные на сегодня способы (назовем их условно методиками) определения причин неисправностей и отказов турбокомпрессоров в эксплуатации можно разделить на 2 группы.

Первая группа представляет собой разного рода и детальной проработанности таблицы неисправностей (рис. 3), в которых прописаны основные симптомы неисправной работы турбокомпрессора и соответствующие

им причины [7, 8], что, на первый взгляд, должно помочь потребителю выполнить поиск причины неисправности (troubleshooting).

Possible Causes	Problem								
	Compressor/turbine wheel defective	Low power/boost pressure too low	Boost pressure too high	Black smoke	Blue Smoke	Turbocharger is noisy	High oil consumption	Oil leakage at compressor	Oil leakage at turbine
Dirty air filter system		•		•	•				
Air-intake and pressure line distorted or leaking		•		•	•				
Excessive flow resistance in exhaust system / leakage upstream of turbine		•		•	•				
Oil feed and drain lines clogged, leaking or distorted						•	•	•	•
Crankcase ventilation clogged or distorted						•	•	•	•
Coke or sludge in turbocharger bearing housing						•	•	•	•
Fuel system/injection system defective or improperly adjusted			•	•	•				
Valve guide, piston rings, engine, or cylinder liners worn / increased blow-by			•	•	•				
Dirty compressor or charge air cooler			•	•	•				
Boost pressure control swing valve / poppet valve does not close			•	•					
Boost pressure control swing valve / poppet valve does not open				•					
Control line to swing valve / poppet valve defective			•	•					
Piston ring seals defective					•	•	•	•	•
Turbocharger bearing damage			•	•	•	•	•	•	•
Foreign-body damage to compressor or turbine			•	•	•	•	•	•	•
Exhaust gas leakage between turbine outlet and exhaust pipe						•			
Engine air collector cracked / missing, loose gaskets			•	•	•				
Turbine housing / swing valve damaged			•	•	•				
Insufficient oil supply to turbocharger			•	•	•				

Рис. 3. Типичная таблица неисправностей турбокомпрессора

Из рис. 3 наглядно видно, что каждой проблеме (симптому) соответствует более десятка возможных причин. Каким образом потребитель сможет проверить их все, и сколько времени для этого нужно, составители таблиц не уточняют

Тем не менее, такое простое представление, при всей его доступности и понятности даже для подготовленных потребителей – владельцев транспортных средств, имеет не только достаточно низкую практическую ценность для многих реальных случаев неисправностей турбокомпрессоров, но и создает трудности при определении причины их неисправности. Это связано с многозначностью указания причины неисправности – таблицы обычно дают при схожести признаков десятки возможных причин, причем чем более "продвинута" и подробна таблица, тем большую неоднозначность она дает [9, 10]. Вследствие этого использование таких таблиц на практике требует настолько большой трудоемкости, что фактически неэффективно, в результате чего потребители в эксплуатации, как правило, затрудняются определить причину возникшей неисправности.

Вторая группа методик объединяет справочники неисправностей турбокомпрессоров [10, 11, 12]. В целом это те же самые таблицы неисправностей, но иллюстрированные фотографиями поврежденных деталей и снабженные подробным описанием самих

повреждений и их причин. Несмотря на более солидный вид, данный способ страдает теми же проблемами неоднозначности – для того, чтобы найти причину неисправности турбокомпрессора, в общем случае требуется выполнить десятки проверок различных версий.



Рис. 4. Типичное описание одного из видов неисправности (загрязнение масла) в справочнике [11]

Общим для обеих методик определения причин неисправностей является то, что фактически они требуют не просто знаний конструкции и работы турбокомпрессоров, а специальной подготовки и экспертного опыта, что препятствует их применению на практике – неподготовленный потребитель, скорее всего, не сможет с их помощью найти неисправность, а высококвалифицированный специалист вполне способен найти неисправность и без них, положившись на свои знания и опыт. Кроме того, поскольку таблицы и справочники неисправностей составляются, главным образом, производителями турбокомпрессоров, в них практически невозможно найти описаний производственных дефектов. С одной стороны, это вполне логично, поскольку указание дефекта в технической литературе производителя воспринимается среднестатистическим потребителем как признание производителем собственного брака. Однако, с другой стороны, отсутствие в справочнике или таблице упоминания о производственных причинах неисправностей сразу делает информацию однобокой и неполной.

В результате правильное определение причины неисправности турбокомпрессора на практике чаще всего удается только специалисту с экспертным опытом исследования причин неисправностей [13, 14] – в других случаях потребитель рискует ошибиться, получить повторный отказ и удвоить, а иногда и утроить собственные затраты на ремонт транспортного средства.

Таким образом, есть все основания утверждать, что несмотря на серьезные усилия в исследованиях и конструировании турбокомпрессоров, к настоящему времени так и не были созданы надежные методики, позволяющие с необходимой для практики достоверностью находить причину неисправности (отказа) этих агрегатов.

### Цель и постановка задачи

Целью работы является разработка простой методики определения причин неисправностей турбокомпрессоров, применимой не только специалистами экспертного уровня, но и средней квалификации.

Для достижения поставленной цели был применен логико-вероятностный метод анализа дерева отказов [15, 16], ранее не применявшийся при определении причин неисправности турбокомпрессоров.

### Особенности анализа технических систем с помощью дерева отказов

Дерево отказов – многоуровневая графологическая структура (граф) причинных взаимосвязей в системе, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения (рис. 5). Возможные воздействия на систему вызывают повреждения (базовые события, порождающие отказ), что приводит к отказу элементов (деталей), затем составных частей (узлов) и всей системы в целом.

Анализ дерева отказов (Fault Tree Analysis – FTA) является распространенным методом моделирования надежности сложных технических систем, выполняемым на стадии их проектирования [15].

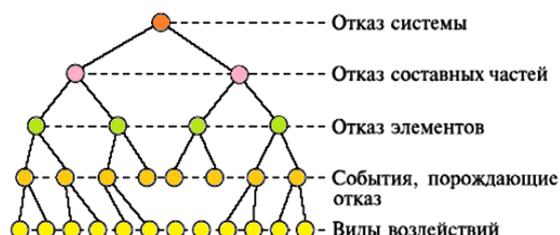


Рис. 5. Дерево отказов

Дерево отказов определяет причинно-следственные связи отказа всей системы с отказами ее подсистем и отдельных элементов, а также другими событиями и воздействиями (рис. 4). Дерево отказов обычно получают в результате последовательной детализации событий, связанных с отказами системы, в направлении от следствия к причине отказа (сверху вниз). При этом анализ выполняется в обратном направлении – "от причины к следствию", а поскольку он проводится на этапе проектирования изделия, такой анализ позволяет рассчитать вероятностные характеристики надежности.

Таким образом, можно выделить два вида анализа, выполняемого с помощью дерева отказов:

1. Качественный (логический) анализ – это нахождение в виде структурного графа всех возможных комбинаций так называемых базовых или элементарных событий, которые могут обусловить наступление исследуемого конечного события (отказа системы).

2. Количественный анализ – определении вероятности наступления конечного события (аварии) на основе структурного графа, полученного путем логического анализа, и данных о вероятностях наступления базовых событий.

Понятно, что количественный анализ, необходимый при проектировании, может иметь ограниченное значение для поиска причин неисправностей агрегата, уже находящегося в массовом производстве, особенно, когда анализ не ставит целью оценку и/или повышение надежности агрегата, поскольку потребитель практически не имеет никаких возможностей повлиять на производство. Вследствие этого основная задача данной работы рассматривалась именно с точки зрения логического анализа.

Понятно, что построение дерева отказов предполагает определение и детальное описание следующих событий:

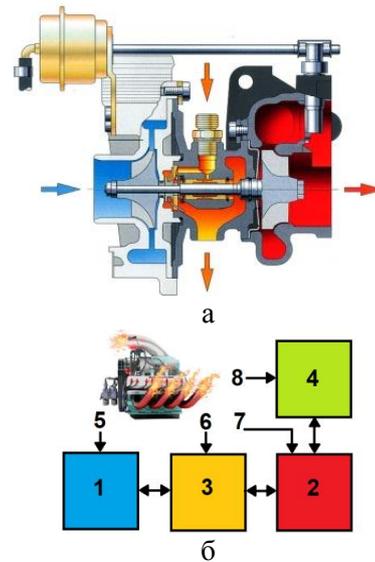
- 1) конечное (аварийное) состояние системы, а также основные его признаки;
- 2) подсистемы (составные части, элементы) и связанные с ними события, которые могут привести к отказу системы;
- 3) воздействия, вызывающие эти события.

Однако, прежде чем начинать работу по составлению дерева отказов, необходимо детально выяснить, с чем именно придется иметь дело, то есть, какие у исследуемой системы характерные особенности, какие у нее

известны виды неисправностей, в чем состоят их причины и каковы их признаки.

### Особенности турбокомпрессора как исследуемой технической системы

Для структурирования и выделения в исследуемой системе составных частей и элементов была принята следующая блочная схема турбокомпрессора, состоящего из 4-х основных узлов – компрессора, турбины, подшипникового узла и системы управления (рис.6). При этом важно то, что каждый из узлов имеет свою собственную связь с ДВС.



1 – компрессор; 2 – турбина; 3 – подшипниковый узел; 4 – система управления (клапан перепускной заслонки типа Wastegate, турбина с регулируемым сопловым аппаратом VNT или другое, с приводным механизмом и блоком управления), внешние воздействия на турбоагнетатель (от двигателя внутреннего сгорания); 5 – впускная система ДВС; 6 – масляная система и картер ДВС; 7 – цилиндры ДВС и выпускной коллектор; 8 – система управления двигателем

Рис. 6. Турбокомпрессор: а – схематическое изображение; б – блок-схема

Так, компрессор связан со впускной системой двигателя, турбина – с цилиндрами и выпускной системой, на подшипниковый узел влияет работа системы смазки, а также условия дренажа масла из подшипников, включая давление в картере. Электронная часть системы управления при этом связана с системой управления двигателем, в то время как исполнительные элементы системы управления зависят от состояния и работы той системы двигателя, где она расположена (например, для клапана Wastegate и турбины с регулируемым сопловым аппаратом VNT это цилиндры и выпускная система).

На данном этапе была проведена проверка источников информации на использование разбиения турбокомпрессора на узлы и применение анализа дерева отказов к предлагаемой блочной схеме. Оказалось, что аналогичный предложенному (рис. 6) принцип деления на узлы с целью последующего анализа в источниках по турбокомпрессорам не обнаруживается, а анализ дерева отказов турбокомпрессора в известных работах практически не упоминается, за исключением работы [17], где дерево отказов настолько сильно упрощено, что вряд ли может иметь практическое применение в задачах поиска неисправностей турбокомпрессоров.

Однако, даже получив блок-схему системы, построить ее дерево отказов просто так, умозрительно, не получится – требуется еще несколько последовательных приближений.

### 1-е приближение к дереву отказов турбокомпрессора – определение источников, причин и признаков неисправностей

Практика показывает [3, 10, 13, 14, 18], что все неисправности турбокомпрессоров в общем случае можно разделить на несколько групп по источникам их возникновения (рис. 7).

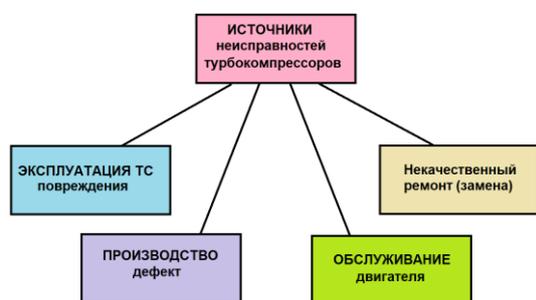


Рис. 7. Источники неисправностей турбокомпрессоров

Первая группа – это производственные неисправности, которые делятся на 2 подгруппы [19] – дефекты первичного производства (качество материалов, мех. обработки и сборки, балансировки и настройки электронной системы управления) и дефекты вторичного производства (ремонта), которые, в свою очередь, подразделяются на дефекты восстановления турбокомпрессора (аналогично первичному производству), замены/установки (не устранена причина выхода турбокомпрессора из строя – грязь в масле, в воздухопроводах, интеркулере, высокое давление в картере, повреждение маслопроводов, использование

герметиков и т.д.) и обслуживания ДВС (некачественное масло, несвоевременное обслуживание, оставленный внутри инструмент, крепеж и т.д.).

Вторая группа – это эксплуатационные неисправности, которые чаще связаны с самим ДВС, они наиболее многочисленны и включают, в 1-ю очередь, нарушение подачи масла (низкое давление) или его слива (повышенное давление в картере ДВС, коксование дренажных магистралей), грязное масло, в том числе, при нарушении рекомендаций по срокам его замены или несоответствующее масло, вызывающее нагарообразование или осадок (особенно, при очень низких и очень высоких температурах), плохая фильтрация воздуха, включая повреждение воздушного фильтра и разгерметизацию впускных воздухопроводов. Кроме того, следует отметить и другие эксплуатационные неисправности, вызванные, в том числе, разрушением деталей ДВС, имеющих выход в цилиндры или в выпускные каналы (клапаны, седла, поршни, поршневые кольца), неисправностями в системе управления агрегата или ДВС (блоки управления, разъемы, кабели), возникшими вследствие эксплуатационного повреждения или старения, включая заклинивание механизма управления (вследствие нагарообразования или повреждения, вызванного различными причинами), а также нормальным эксплуатационным износом при длительной эксплуатации.

При составлении дерева отказов турбокомпрессора важно также определить признаки, по которым можно судить о наличии неисправности или состоянии отказа. Это в общем случае 3 группы признаков:

1) признаки неисправности, которые видит водитель, в том числе, потеря мощности двигателя, шум, дым, расход масла, самопроизвольный набор оборотов (у дизелей), срабатывание контрольной лампы неисправности;

2) признаки, выявляемые при обслуживании транспортного средства, например, коды ошибок в системе управления, внешние повреждения, течи жидкостей;

3) признаки, которые видны на частично и полностью разобранным турбокомпрессоре, и двигателе, например, различные повреждения и следы на деталях – компрессор, турбина, подшипниковый узел, система управления, а также впускная, выпускная системы и цилиндр двигателя.

С противоположной стороны дерева отказов стоят события, порождающие отказ

(рис. 5). Фактически это причины поврежденности турбокомпрессора, если он рассматривается отдельно от двигателя. Для практических целей их полезно тоже разделить на группы, хотя такое разделение сложно вследствие взаимного влияния групп причин друг на друга (рис. 8).

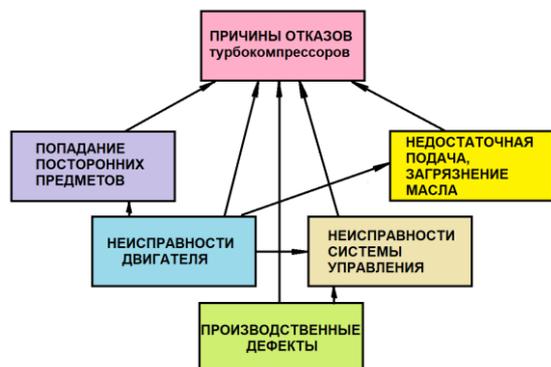


Рис. 8. Основные группы причин неисправностей турбокомпрессоров

Например, неисправности двигателя нередко приводят к нарушению подачи масла, но могут быть причиной и попадания посторонних предметов в турбокомпрессор. В то же время, превышение оборотов ротора (перекрут) и перегрев турбины могут быть как следствием влияния самого двигателя, так и возникнуть в результате отказа системы управления, включая заклинивание регулирующего механизма. Тем не менее, схема (рис.8) может быть полезна при анализе неисправности демонтированного турбокомпрессора, исследуемого отдельно от двигателя.

Теперь для того, чтобы связать имеющиеся группы признаков и причин в единую логическую схему дерева отказов, необходимо подробно рассмотреть повреждения и дефекты всех ранее выделенных узлов турбокомпрессора.

### 2-е приближение - детализация признаков и причин отказов по узлам агрегата

С этой целью, в том числе, с использованием известного опыта исследования причин отказов [3, 10, 11, 13, 14, 18], были выделены характерные виды повреждений узлов (блоков) турбокомпрессора.

На рис. 9 в качестве примера показаны наиболее характерные повреждения компрессора и турбины, для других узлов – подшипников и системы управления, были составлены аналогичные описания с иллюстрациями.

Детализация повреждений послужила основой и позволила непосредственно перейти к

заключительному этапу исследования – составлению дерева отказов.

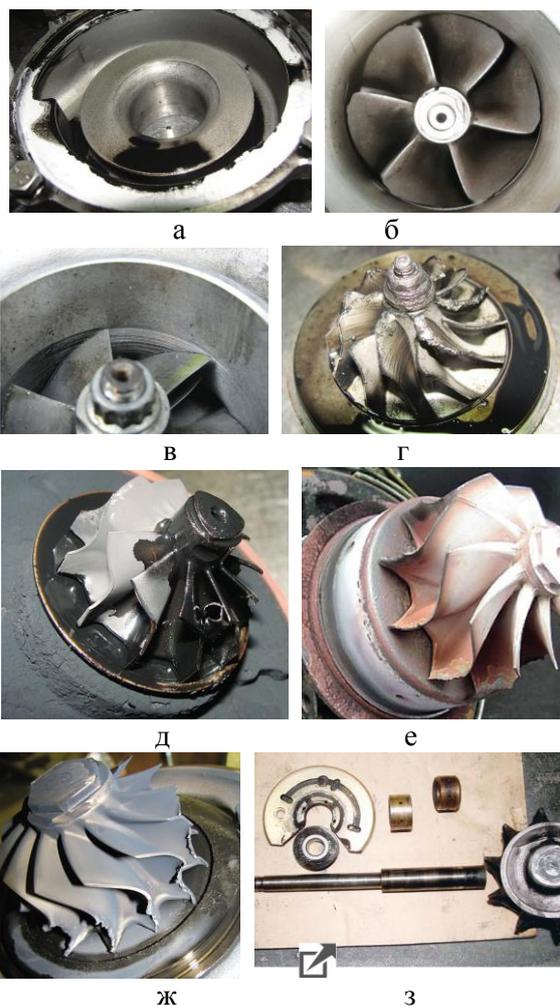


Рис. 9. Некоторые типичные повреждения (или признаки повреждения) компрессора и турбины: а – масло в компрессоре; б – износ; эрозия лопаток, в – задевание лопаток за корпус (большой радиальный и/или осевой люфт ротора); г – повреждение (деформация) лопаток; д – масло в турбине; е – перегрев лопаток; ж – повреждение лопаток посторонним предметом; з – поломка вала с отделением от колеса

### 3-е приближение - составление дерева отказов турбокомпрессора

Понятно, что даже несмотря на ограниченное число узлов турбокомпрессора, количество возможных повреждений получается значительным. Поэтому вначале был рассмотрен упрощенный вариант – отказ турбокомпрессора только по одной из возможных причин, в качестве которой было выбрано попадание постороннего предмета в компрессор. Для данного повреждения была рассмотрена следующая последовательная

цепь событий, приводящая к отказу.

1. Отказ системы – формулировался как неработоспособность турбокомпрессора.

2. Отказ системы – означал отказ одной из составных частей (компрессор, турбина с валом, подшипниковый узел с уплотнениями), в том числе, вал ротора – усталостное разрушение, и повреждение и/или разрушение уплотнительных колец (течь масла через турбокомпрессор).

3. Отказ составных частей – был вызван отказом одного из элементов (колесо компрессора с лопатками, колесо турбины с лопатками и валом, втулки подшипников с уплотнениями), причем в виде как прямого повреждения - деформации и/или разрушения лопаток колеса компрессора (гайка вала и резьбовой хвостовик вала повреждены посторонним предметом, повреждение корпуса компрессора), так и вторичного повреждения, включающего перегрев и задиры подшипников, нарушение уплотнительных свойств колец (масло в корпусе компрессора, турбины) и повреждение турбины (касание колеса и корпуса, перегрев, повышенный шум).

4. События, порождающие отказ – также были разделены на первичные, в виде повре-

ждения лопаток колеса и корпуса компрессора (видимых визуально), и вторичные, среди которых увеличение остаточного дисбаланса и люфтов ротора, рост виброускорения, касание колес корпусных деталей, рост радиальных нагрузок на опорные подшипники, а также пробой масляной пленки, работа подшипников в режиме полусухого трения.

5. Виды воздействий как способы попадания постороннего предмета формулировались так: предмет оставлен во впускном канале при ремонте, попал через разрушенный воздушный фильтр или попал через негерметичное сопряжение или поврежденный воздуховод.

При составлении дерева отказа данного вида было принято условие, обычно используемое для данного метода анализа [15, 16] – каждое событие и/или отказ при наличии нескольких влияющих факторов (входов) имеет логическую связь только с одним последующим событием (то есть, у каждого элемента дерева есть только один выход). Однако полученное таким способом дерево отказа (рис. 10) оказалось чрезмерно громоздкой конструкцией, что, очевидно, и определялось поставленным условием.

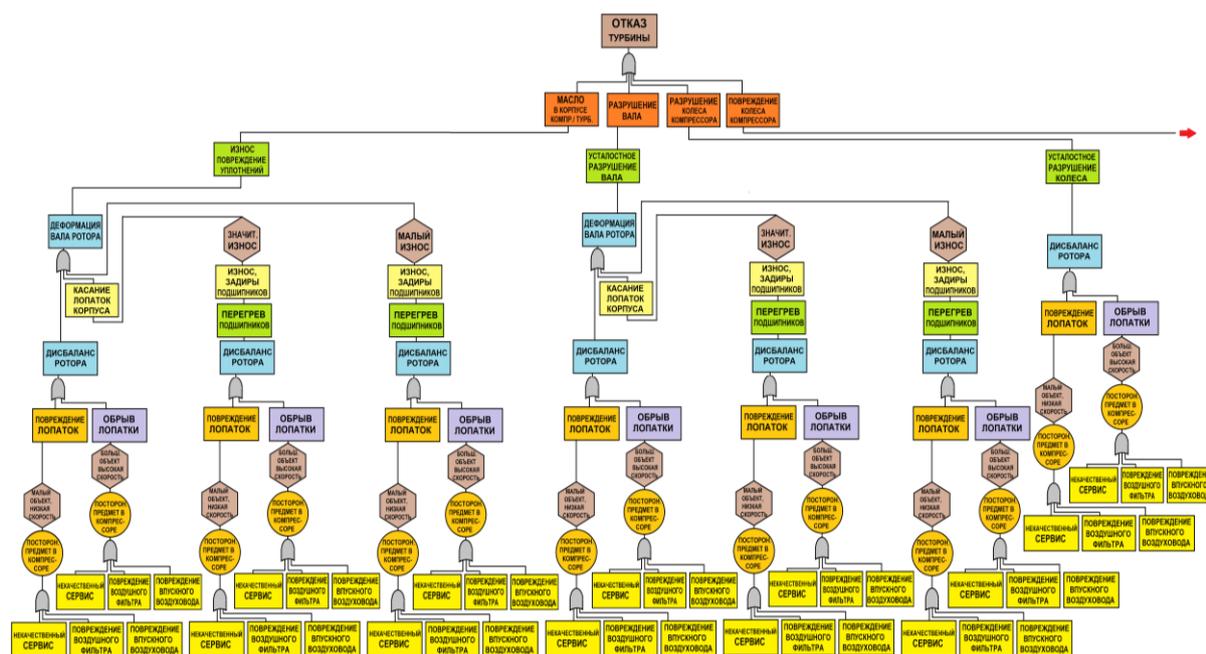


Рис. 10. Общий вид дерева 1 отказа (попадание постороннего предмета в компрессор) в случае использования условия одного выхода для каждого элемента дерева

Действительно, данное условие хорошо подходит для расчетной оценки надежности системы, но плохо подходит для логического анализа с целью определения причины неисправности. Поэтому для упрощения задачи было построено модифицированное дерево

отказов (рис. 11,а), в котором было допущено, что каждое текущее событие может иметь логическую связь сразу с несколькими последующими процессами (событиями).

Однако и данный результат, несмотря на уже вполне простую логичную форму, еще не

вполне соответствует задаче определения причины неисправности. Так, в общепринятом дереве отказов анализ выполняется снизу вверх – от базисных событий к отказу, в то

время как в задачах поиска причины неисправностей требуется, очевидно, обратное направление – от отказа к базисным событиям.

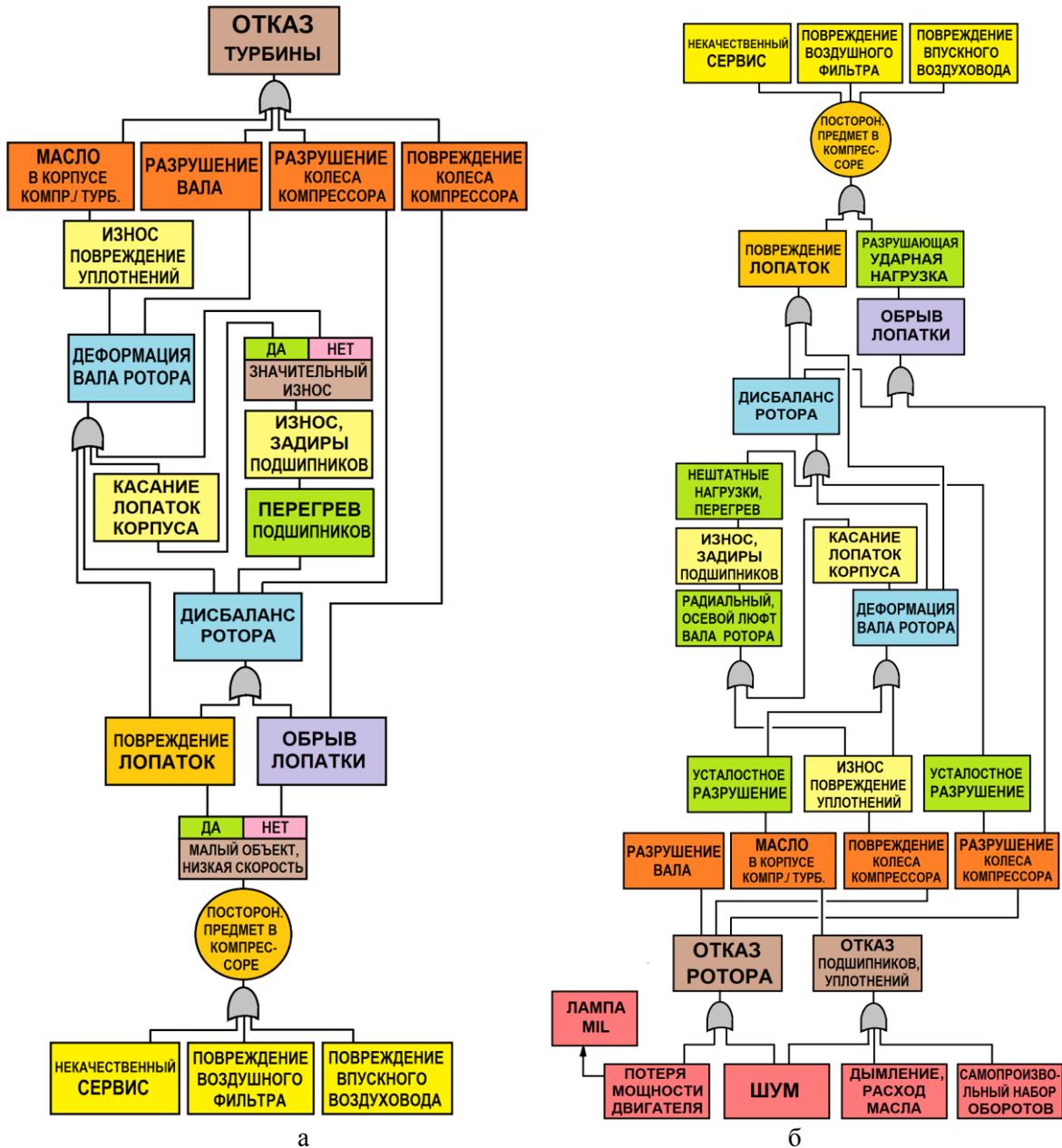


Рис. 11. Дерево отказа при попадании постороннего предмета в компрессор:  
а – модифицированное; б – перевернутое

Чтобы сохранить направление анализа (снизу вверх), модифицированное дерево отказа было преобразовано в перевернутое (рис. 11, б), при этом были использованы следующие общие принципы его построения:

1. Каждое событие может иметь логическую связь как с несколькими предыдущими, так и несколькими последующими событиями.
2. Логический анализ идет не от базисных событий к отказу, а наоборот – от отказа к ба-

зисным событиям – в соответствии с направлением поиска причины неисправности.

3. Отказ может быть разделен по признакам его проявления, видимым в эксплуатации транспортного средства.

4. К каждому событию может быть добавлен процесс, его вызывающий, что облегчает логический анализ.

Эти же принципы были положены в основу при составлении общего дерева отказов

турбокомпрессора в окончательном виде (рис. 12).

Таким образом, был получен логически структурированный граф, в котором четко выделены не только промежуточные состояния узлов и элементов, но и подробно прописаны признаки, по которым водитель обычно уста-

навливает факт неисправности или отказа.

При этом базисные события, вызывающие отказы, и связанные с ними виды воздействий отдельно представлены на рис. 13 и являются дополнением к графу (рис. 12), позволяющим уточнять причины отказов.

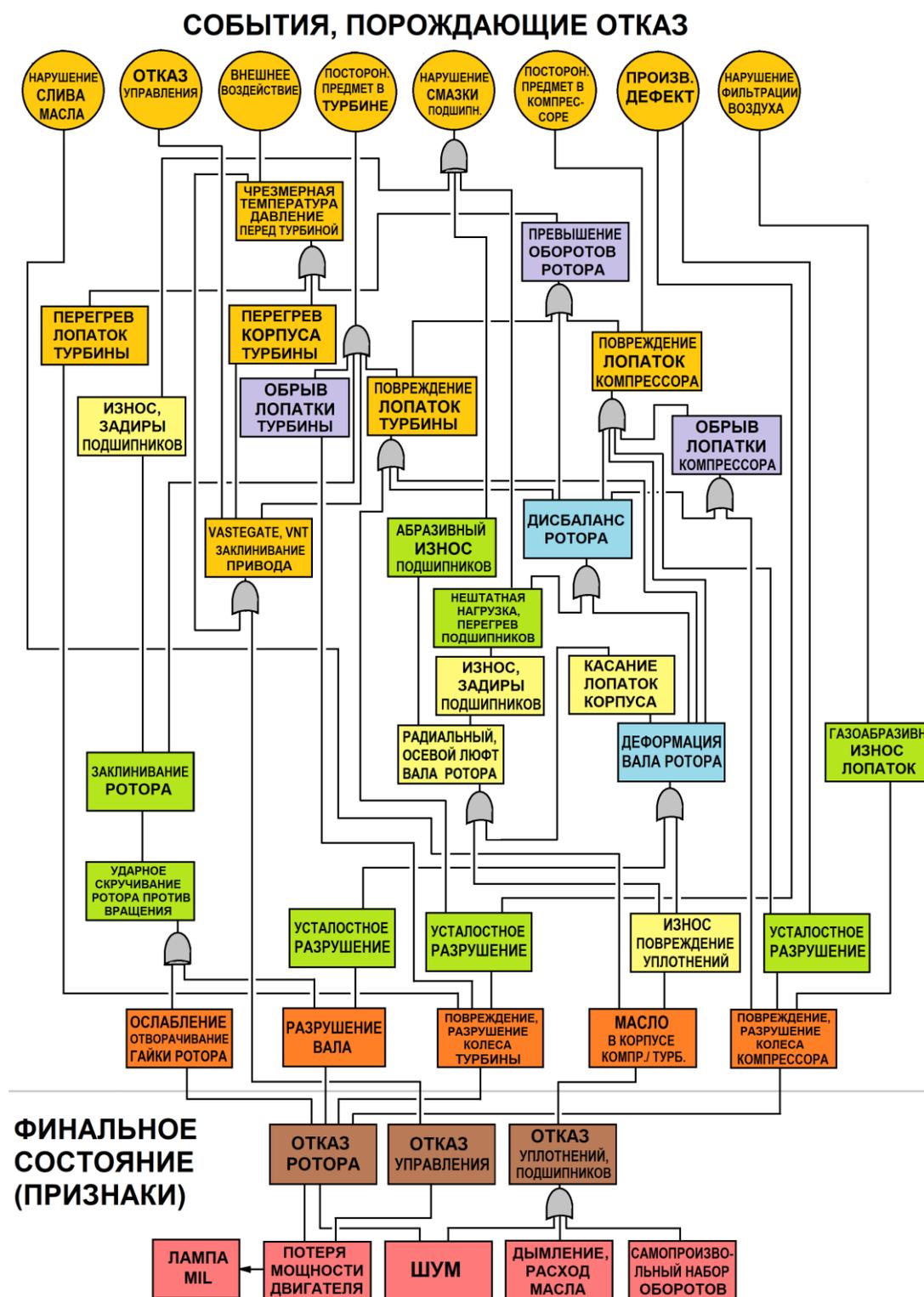


Рис. 12. Модифицированное перевернутое дерево отказов турбокомпрессора

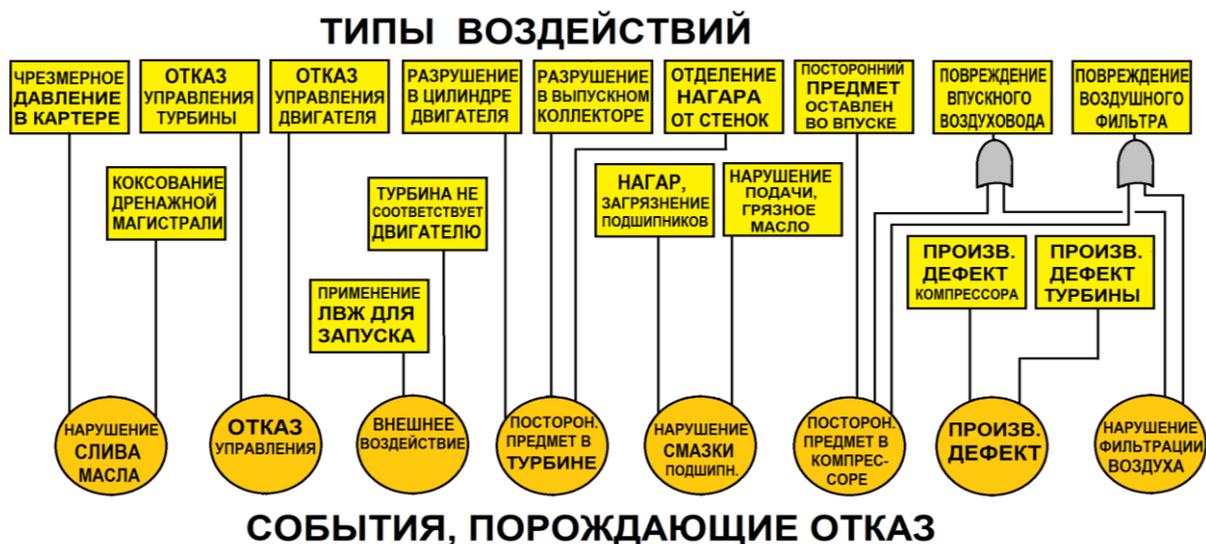


Рис. 13. Связь воздействий и событий, вызывающих повреждение и отказ

### Проверка достоверности предлагаемой методики на конкретных случаях отказов

Проверка методики была выполнена для нескольких практических случаев, в качестве примера ниже представлен логический анализ отказа восстановленного турбокомпрессора Cummins/Holset дизеля Cummins ISF3.8 [20].

Из описания дефектации агрегата известно (рис. 14), что корпус турбины имеет следы перегрева (цвета побежалости) и коррозии, имеется также разрушение в компрессоре.

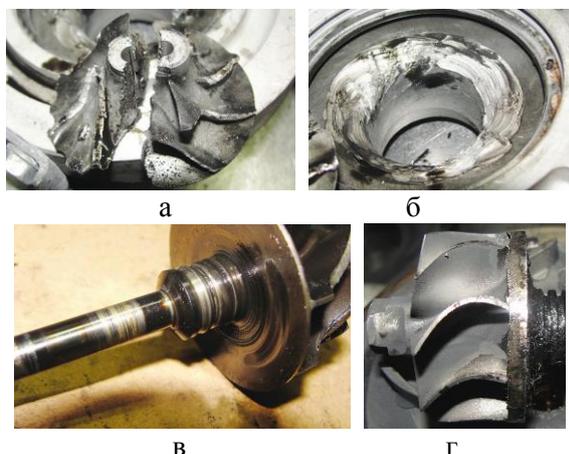


Рис. 14. Разрушенное колесо компрессора: а – поврежденный корпус; б – перегрев и повреждение подшипников, вала; в – перегрев и повреждение лопаток турбины; г –

следствие превышения частоты вращения ротора (перекрута)

Демонтаж корпусов турбокомпрессора выявил моторное масло в корпусах турбины и компрессора, колесо компрессора, разрушенное по ступице на две части, повреждение и деформацию внутренних поверхностей корпуса компрессора, а также перегрев и повреждение лопаток турбины из-за соприкосновения с корпусом турбины в осевом и радиальном направлениях. Далее при разборке корпуса подшипников было обнаружено, что на шейках вала ротора имеются частицы материала опорных подшипников скольжения, рабочие поверхности подшипников имеют следы полусухого трения и износа, а уплотнение корпуса подшипников со стороны колеса турбины повреждено.

Далее по разработанной схеме (дереву) был выполнен логический анализ с движением от отказа (предполагалось, что финальное состояние отказа было установлено по падению мощности двигателя) к базисным событиям при условии соответствия признаков, имеющих на деталях. Цепочки событий, соответствующих данному отказу, представлены на рис. 15.

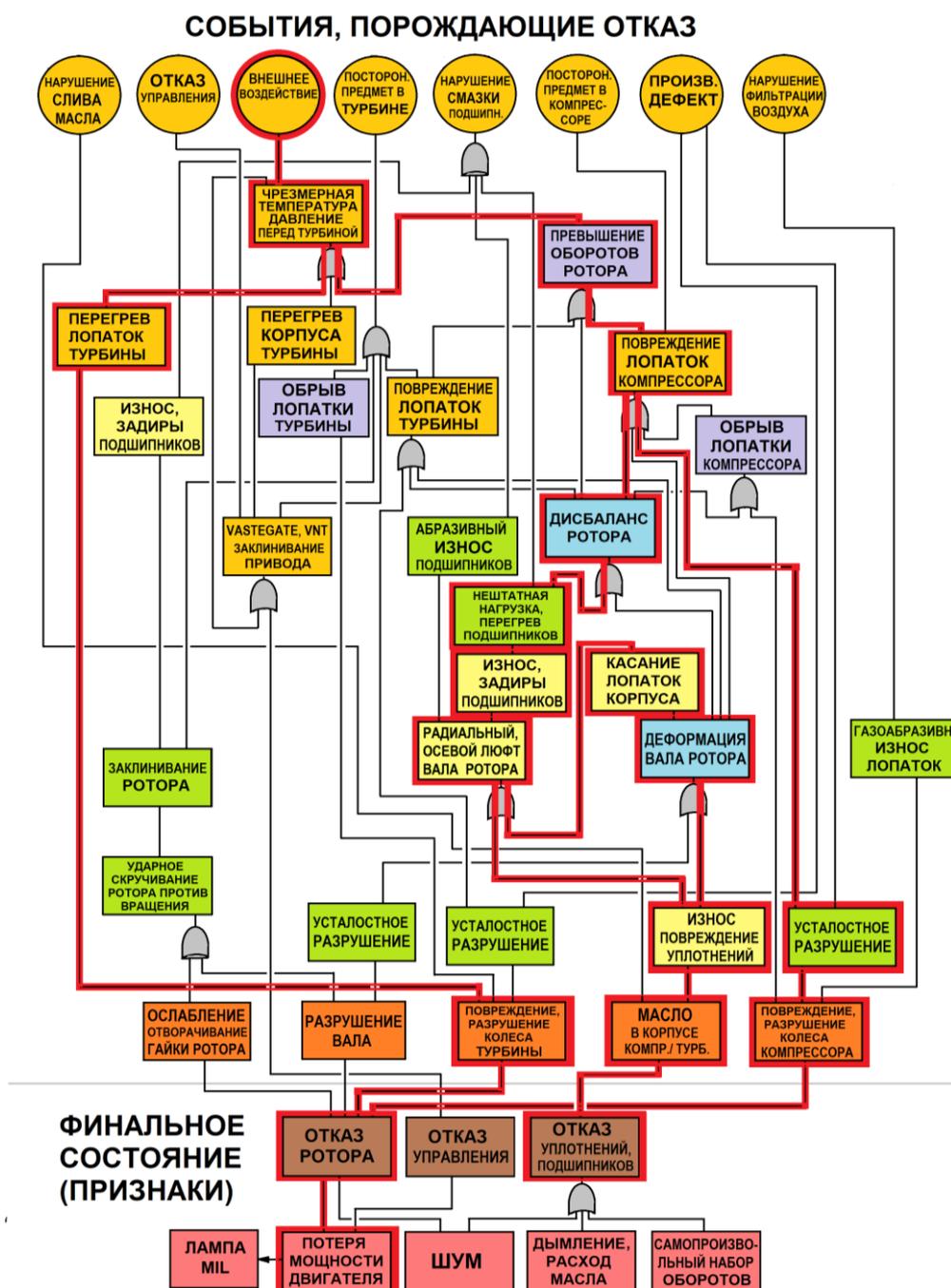


Рис. 15. Пример определения причины отказа с помощью разработанной методики (цепи возможных событий отказа отмечены красным)

Из рис. 15. хорошо видно, что признаки отказов узлов и элементов 3-мя параллельными линиями выводят на одно и то же базисное событие, а именно, превышение частоты вращения ротора (перекрут). Поскольку при этом никаких признаков использования легковоспламеняющихся жидкостей, которые могли бы вызвать перекрут, найдено не было (рис. 13), был сделан вывод о том, что причиной отказа является установка нештатного агрегата, меньшего по размерам стандартного для данного двигателя, но подходящего к двигателю по присоединительным размерам,

что и привело к перекруту. Такой же вывод был сделан в реальном исследовании, проведенном опытным специалистом-экспертом, в том числе, путем изучения маркировки и сравнения агрегата со стандартным турбокомпрессором [20]. Однако при использовании методики для правильного вывода не потребовалось высокой квалификации специалиста, а весь процесс определения причины отказа при наличии подробного описания повреждений деталей занял только несколько минут.

### Выводы

1. Несмотря на успехи в разработке конструкций высокоэффективных турбокомпрессоров для наддува ДВС, к настоящему времени не создано надежных методик для определения причин их отказов, существующие методики дают десятки возможных причин, вследствие чего их использование на практике требует настолько большой трудоемкости и фактически неэффективно. Во многих случаях это приводит к повторению отказов и неоправданно высоким затратам в эксплуатации.

2. С другой стороны, при оценке надежности агрегатов широко используются логико-вероятностные модели, описывающие причинно-следственные связи отказов всей системы с отказами отдельных элементов и другими событиями (воздействиями), в том числе, метод анализа дерева отказов. Однако такие методы, применяемые на практике для расчетов вероятностных характеристик и рисков отказов, не вполне соответствуют задачам поиска причин неисправностей.

3. Выполненное исследование показывает, что определение причины неисправности турбокомпрессоров наддува ДВС может быть выполнено на основе анализа модифицированного дерева отказов, позволяющего выполнять анализ в обратном по отношению к общепринятому направлению – от события отказа всей системы к базисным событиям, инициирующим отказ в отдельных ее элементах.

4. Проверка предлагаемой в работе методики, построенной на указанных принципах и с привлечением опыта исследования неисправностей турбокомпрессоров, на реальных случаях отказов показала, что определение причины отказа может быть сделано с достаточной для практики достоверностью при минимальных затратах времени.

### Литература

1. Giakoumis E. G. Turbochargers and Turbocharging: Advancements, Applications and Research. Nova Science Publishers, New York, 2017. 550 p.
2. Галеркин Ю. Б., Козаченко Л. И. Турбокомпрессоры. СПб, Изд-во Политехнического Университета, 2008. 374 с.
3. Самохин С., Ермоленко И. Вскрытие показало. Часть 7. *АВС-авто*, 10/2016. URL: <https://abs-magazine.ru/article/vskrytie-pokazalo-chast-7-kosjak> (дата обращения 20.09.2019).
4. Gillette R. Honeywell Turbo Technologies. Presentation. Honeywell, Scottsdale, AZ Dec.

2004. URL: [http://www.corporate-ir.net/media\\_files/irol/94/94774/presentations/TurboHON.pdf](http://www.corporate-ir.net/media_files/irol/94/94774/presentations/TurboHON.pdf) (дата обращения 20.09.2019).
5. BorgWarner EFR Turbocharger. Technical Training Guide. TechTG-1110-B. BorgWarner Turbo Systems, 2010. URL: [http://www.turbos.borgwarner.com/files/pdf/efr\\_turbo\\_technical\\_brief.pdf](http://www.turbos.borgwarner.com/files/pdf/efr_turbo_technical_brief.pdf) (дата обращения 20.09.2019).
6. Kohler M. Turbochargers in the workshop. Technology, variants, troubleshooting. KRAFTHAND Practical Know-how series, Volume 17. Krafthand Medien GmbH, 2017. 62p.
7. Garrett Advanced Motion. Original Performance, Volume 8. Honeywell Turbo Technologies, USA, 2018. 74 p.
8. Garrett Turbochargers. Catalogue. Honeywell Turbo Technologies, USA, 2008. URL: <https://www.garrettmotion.com/turbo-replacement/aftermarket-remanturbochargers-catalog/> (дата обращения 20.09.2019).
9. The Turbo for the Aftermarket. Turbochargers by Mahle. Technical information MO-4-811. MAHLE Clevite Inc., United States, 2009. 8 p.
10. Miller J. Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems (S-A Design) Paperback, CarTech, 2008. 160 p.
11. Turbocharger: Damage Profiles, Causes, and Prevention. Technical information MO-2-613. MAHLE Clevite Inc., United States, 2008. 16 p.
12. MAHLE Turbocharger Catalogue. Technical Service. Catalog No.TC-10-19, Supersedes TC-10-11, Mahle GmbH, 2019. 159 p.
13. Самохин С., Ермоленко И. Вскрытие показало. Часть 1. *АВС-авто*. 08. 2015, С. 28-35.
14. Самохин С., Ермоленко И. Вал - пополам, турбина - вдребезги. *АВС-авто*. 05. 2017. URL: <https://abs-magazine.ru/article/val-popolam-turbina-vdrebezgi> (дата обращения 20.09.2019).
15. Шубин Р. А. Надёжность технических систем и техногенный риск. Тамбов, Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 80 с.
16. ГОСТ Р МЭК 62502-2014. Анализ дерева событий. IEC 62502:2010 Analysis techniques for dependability – Event tree analysis (ETA) (IDT). Москва, Стандартинформ, 2015. 30 с.
17. Laskowski R. Fault Tree Analysis as a tool for modeling the marine main engine reliability structure. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 2015, no.41(113), pp.71-77.
18. Greuter E., Zima S. Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine Failures and Their Causes. SAE International, USA, 2012. 568 p.
19. Хрулев А., Лосавио С., Дроздовский В. Экспертиза технического состояния и причины неисправности автомобильной техники. Москва, Издательство АВС, 2019. 966 с.
20. Самохин С., Ермоленко И. Вскрытие показало. Часть 3. *АВС-авто*, 02. 2016. С. 18-23.

## References

1. Giakoumis E. G. (2017) Turbochargers and Turbocharging: Advancements, Applications and Research. Nova Science Publishers, New York.
2. Galerkin Y. B., Kozachenko L. I. (2008) Turbokompressor [Turbochargers]. SPb, Publishing house of Polytechnic University. [in Russian].
3. Samokhin S., Ermolenko I. Vskrytie pokazalo. Chast 7 [Autopsy revealed. Part 7]. ABS-auto, 2016, no.10. Available at: <https://abs-magazine.ru/article/vskrytie-pokazalo-chast-7-kosjak> (Accessed 20 September 2019).
4. Gillette R. (2019) Honeywell Turbo Technologies. Presentation. Honeywell, Scottsdale, AZ Dec. 2004. Retrived from: [http://www.corporate-ir.net/media\\_files/irol/94/94774/presentations/TurboHO N.pdf](http://www.corporate-ir.net/media_files/irol/94/94774/presentations/TurboHO N.pdf) (Accessed 20 September 2019).
5. Borg Warner EFR Turbocharger. Technical Training Guide. TechTG-1110-B. BorgWarner Turbo Systems, 2010. Retrived from: [http://www.turbos.borgwarner.com/files/pdf/efr\\_turbo\\_technical\\_brief.pdf](http://www.turbos.borgwarner.com/files/pdf/efr_turbo_technical_brief.pdf) (accessed 20.09.2019).
6. Kohler M. (2017) Turbochargers in the workshop. Technology, variants, troubleshooting. KRAFTHAND Practical Know-how series, Volume 17. Krafthand Medien GmbH.
7. Garrett Advanced Motion. (2018) Original Performance, Volume 8. Honeywell Turbo Technologies.
8. Garrett Turbochargers. Catalogue. Honeywell Turbo Technologies (2008). Retrived from: <https://www.garrettmotion.com/turbo-replacement/aftermarket-reman-turbochargers-catalog/> (Accessed 20 September 2019).
9. (2009) The Turbo for the Aftermarket. Turbochargers by Mahle. Technical information MO-4-811. MAHLE Clevite Inc.
10. Miller J. (2008) Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems (S-A Design) Paperback, CarTech.
11. Turbocharger: Damage Profiles, Causes, and Prevention. (2008) Technical information MO-2-613. MAHLE Clevite Inc.
12. Mahle Turbocharger Catalogue. Technical Service. Catalog No.TC-10-19, (2019) Supersedes TC-10-11, Mahle GmbH.
13. Samokhin S., Ermolenko I. (2015) Vskrytie pokazalo. Chast 1 [Autopsy revealed. Part 1]. ABS-auto, 8. [in Russian].
14. Samokhin S., Ermolenko I. (2017) Val - popolam, turbina - vdrebezgi [Shaft is in half, turbine is to smithereens]. ABS-auto, 5. Retrived from: <https://abs-magazine.ru/article/val-popolam-turbina-vdrebezgi> (accessed 20.09.2019). [in Russian].
15. Shubin R. A. (2012) Nadejnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk [Reliability of technical systems and technological risk]. Tambov, Publishing house FGBOU VPO "TGTU". [in Russian].
16. GOST R MEK 62502-2014. Analiz dereva cobytyi [Event tree analysis]. IEC 62502:2010 Analysis techniques for dependability – Event tree analysis (ETA) (IDT). Moscow, Standartinform, 2015. [in Russian].
17. Laskowski R. (2015) Fault Tree Analysis as a tool for modeling the marine main engine reliability structure. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 41 (113), 71-77.
18. Greuter E., Zima S. (2012) Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine Failures and Their Causes. SAE International.
19. Khrulev A., Losavio S., Drozdovsky V. (2019) Expertiza tekhnicheskogo sostoyania i prichiny neispravnosi avtomobilnoi tekhniki [The technical condition expertise and the automotive technology faults causes]. Moscow, Publishing house ABS. [in Russian].
20. Samokhin S., Ermolenko I. (2016) Vskrytie pokazalo. Chast 3 [Autopsy revealed. Part 3]. ABS-auto, 2, 18-23. [in Russian].

**Хрулев Александр Эдуардович**, к.т.н., с.н.с., судебный эксперт по специальности 10.2 «Исследование технического состояния транспортных средств», alo.engine@gmail.com, тел. +380961632183,

<sup>1</sup>Международное моторное бюро, ул. Школьная, д. 15, пгт. Немешаево, Бородинский район, Киевская область, 07853, Украина.

#### **Використання логіко-імовірнісних методів для визначення причин відмов турбокомпресорів в експлуатації ДВЗ**

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Всупереч успіхам в дослідженнях і розробці конструкцій турбокомпресорів наддуву двигунів внутрішнього згоряння, до теперішнього часу не створено надійних методик для визначення причин їх відмов, а застосування відомих методик на практиці вимагає велику трудомісткість і фактично неефективно. В результаті в експлуатації споживачі, як правило, не можуть визначити причину виниклої несправності. **Мета.** Розробка простої методики для визначення причин несправностей і відмов турбокомпресорів. **Методика.** Проведене дослідження показало, що причини несправності турбокомпресорів наддуву ДВС можуть визначатися за допомогою логіко-імовірнісних методів, в тому числі, на основі аналізу дерева відмов, із залученням наявного досвіду дослідження несправностей турбокомпресорів. З цією метою була прийнята блокова схема турбокомпресора, що складається з 4-х основних вузлів – компресора, турбіни, підшипникового вузла і системи управління. Використовувалися послідовні наближення для складання методики – спочатку визначалися джерела, ознаки та причини несправностей з розбиттям їх на групи, далі на основі наявного досвіду дослідження

причин відмов виконувалася деталізація ознак і причин по вузлах, з докладним описом характерних видів ушкоджень турбокомпресора, на підставі чого були отримані всі необхідні дані для складання дерева відмов. **Результати.** Розроблено модифіковане (перевернуте) дерево відмов, що дозволяє виконувати логічний аналіз у зворотному щодо загальноприйнятого напрямку — від події відмови системи до базисних подій, які ініціюють відмову. Перевірка запропонованої методики на реальних випадках відмов показала, що визначення причини відмови може бути зроблено з достатньою для практики вірогідністю при мінімальних витратах часу. **Наукова новизна.** Відомий метод аналізу дерева відмов був використаний для розробки нової методики визначення причин відмов в турбокомпресорах наддуву ДВС. **Практична значущість.** Використання запропонованої методики дозволяє виключити повторення відмов і невинувато високі витрати на експлуатацію та ремонт, що виникають внаслідок неправильного визначення причини відмови турбокомпресорів. **Ключові слова:** двигун внутрішнього згоряння; турбокомпресор; несправність; причина; аналіз дерева відмов.

**Хрулев Олександр Едуардович**, к.т.н., с.н.с., судовий експерт за фахом 10.2 «Дослідження технічного стану транспортних засобів», alo.engine@gmail.com, тел. +380961632183, <sup>1</sup>Міжнародне моторне бюро, вул. Шкільна, б.15, смт. Немішаєве, Бородянський район, Київська область, 07853, Україна

#### **Applying logical and probabilistic methods to determine the causes of failure of turbochargers in the internal combustion engines operation**

**Abstract. Problem.** Despite the success in research and development of turbocharger designs for internal combustion engines, to date, reliable methods have not been created to determine the causes of their failures, and the application of known methods in practice is so labour-consuming that it is practically ineffective. As a result, in operation, consumers, as a rule, find it difficult to determine the cause of the

malfunction. **Goal.** The goal of the study is the development of a simple technique for determining the causes of the turbochargers failures.

**Methodology.** The study showed that the causes of failure of turbochargers of the internal combustion engines can be determined using logical and probabilistic methods, including those on the basis of a failure tree analysis, using on existing experience in studying turbocharger faults. For this purpose, a block diagram of a turbocharger was adopted, consisting of 4 main components – a compressor, a turbine, a bearing assembly and a control system. Consistent approximations were used to compile the methodology: first, the sources, symptoms and causes of malfunctions were identified with their breakdown into groups, then, based on the existing experience of studying the causes of failures, the signs and causes were detailed by nodes, with a detailed description of the characteristic types of damage to the turbocharger, based on which all the necessary data were used to compile a fault tree. **Results.** A modified (inverted) fault tree was developed, which allows performing logical analysis in the opposite direction to the generally accepted direction – from the system failure event to the basic events initiating the failure. Testing the proposed methodology in real cases of failures showed that determining the cause of the failure can be done with sufficient reliability for practice with minimal time. **Originality.** The well-known fault tree analysis method was used to develop a new methodology for determining the causes of failures in ICE turbochargers. **Practical value.** Using the proposed methodology eliminates repetition of failures and unreasonably high costs of operation and repair arising from improper determination of the cause of failure of the turbocharger.

**Keywords:** internal combustion engine; turbocharger; failure; cause; fault tree analysis.

**Alexander E. Khrulev**, PhD, Senior researcher, forensic expert by specialty 10.2 «Vehicles technical state investigation», alo.engine@gmail.com, tel. +380961632183,

<sup>1</sup>International Motor Bureau, Shkilna str., 15, Nemishaeve, Borodyanka district, Kyiv region, 07853, Ukraine.