

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 66.011, 658.588.5

### НАДЕЖНОСТЬ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Н.Н. Прохоренко, доцент, К.О. Гончарук<sup>@</sup>, аспирант**

Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий),  
кафедра процессов и аппаратов химической технологии им. Н.И. Гельперина,  
Москва, 119571 Россия

<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: [goncharuk.kirill@gmail.com](mailto:goncharuk.kirill@gmail.com)

*В промышленности наблюдается неприятное явление, заключающееся в том, что значительная часть ВВП теряется из-за внезапных остановок и последующих долгих простоев производящих промышленных систем. Анализ причин данного явления позволил сформулировать концепцию решения проблемы и предложить метод исследования надежности (работоспособности) химико-технологических систем (ХТС). В данной статье доказывается необходимость применения инструментария анализа технологической надежности на этапе проектирования производства для оценки потенциальной работоспособности технологии и исключения значительных расходов ресурсов на запуски и остановки.*

**Ключевые слова:** надежность, работоспособность, ХТС, пуско-наладочные работы, внезапные остановки, вероятность простых и сложных событий.

### TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF CHEMICAL ENGINEERING SYSTEMS

**N.N. Prokhorenko, K.O. Goncharuk<sup>@</sup>**

Moscow Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies),  
Moscow, 119571 Russia

<sup>@</sup>Corresponding author, e-mail: [goncharuk.kirill@gmail.com](mailto:goncharuk.kirill@gmail.com)

*A significant part of the gross domestic product is lost because of hitches followed by long downtime periods in industrial systems. This is a common problem in the industry of developed nations. Analysis of causes of this phenomenon allows developing a conception of solving this problem and suggesting a method of studying the reliability (working capacity) of chemical-engineering systems (CES). In this article we prove the need for technological reliability analysis tools in prefeasibility study to estimate the potential working capacity of the technology and to avoid the large costs of starts and stops.*

**Keywords:** dependability, reliability, working capacity, chemical engineering, process engineering, hitch.

#### Введение

В промышленности наблюдается неприятное явление, заключающееся в потере значительной части ВВП из-за внезапных остановок и последующих долгих простоев производящих промышленных систем. Анализ причин данного явления позволил сформулировать концепцию решения проблемы и предложить метод исследования надежности (работоспособности) химико-технологических систем (ХТС).

Предлагаемый метод исследования надежности ХТС основан на полностью легитимных определениях понятий:

1. Системой называется совокупность взаимо-

действующих частей. Частями ХТС назовем химическую технологию, процессы и аппараты химической технологии и оборудование химических производств.

2. Надежность – работоспособность во времени [1].

3. Работоспособность – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и/или конструкторской документации [1].

Последнее определение требует уточнений. Под заданными функциями в химической промышленности, как правило, понимают годовую производитель-

ность ХТС по целевому продукту и качество этого продукта.

Соответствие параметров нормативно-технической и/или конструкторской документации означает следующее. Пусть  $Y_i$  – один из параметров, характеризующих способность ХТС выполнять заданные функции. Пусть  $Y_{i0}$  – номинальное, проектное значение этого параметра, а  $\Delta Y_i$  – разрешенный разработчиками диапазон отклонения этого параметра от номинала. Будем считать, что  $Y_i$  соответствует требо-

ваниям нормативно-технической и/или конструкторской документации, если

$$|Y_i - Y_{i0}| < \Delta Y_i$$

На практике ограничение на амплитуду отклонения  $\Delta Y_i$  бывают асимметричны: или только справа, или только слева (рис. 1). Эти параметры, т.е. с ограничением на амплитуду отклонения, далее будем называть заданными параметрами

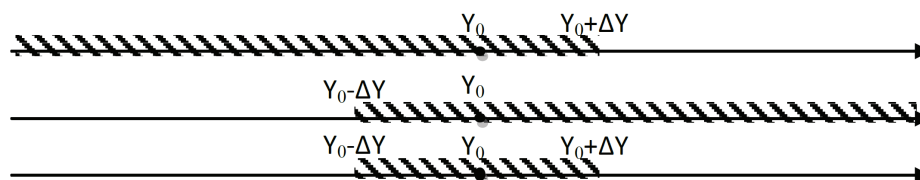


Рис. 1. Варианты разрешенного интервала изменений заданного параметра  $Y_i$ .

Из этих определений следует, что ХТС работоспособна, когда и если ВСЕ заданные параметры ( $Y_i$ ) принадлежат своим разрешенным интервалам изменения ( $\Delta Y_i$ ). Следовательно, ХТС находится в состоянии отказа, когда и если ХОТЯ БЫ ОДИН заданный параметр вышел из своего разрешенного интервала изменения.

Например, пусть номинальная температура технологического газового потока на входе в слой катализатора равна  $300^\circ\text{C}$  (таким образом,  $Y_{i0} = T = 300^\circ\text{C}$ ). Из технических условий эксплуатации катализатора получаем разрешенный интервал изменений  $\Delta Y_i = \Delta T = \pm 20^\circ\text{C}$ . Физическое обоснование такого интервала состоит в следующем: если температура технологического потока газов в слое катализатора станет больше  $320^\circ\text{C}$ , то произойдет разрушение носителя катализатора, производительность ХТС станет нулевой, и наступит отказ ХТС. Если же температура газов станет меньше  $280^\circ\text{C}$ , то скорость катализа существенно уменьшится, и в этом случае также произойдет отказ ХТС.

Исторически надежностью раньше всех начали заниматься машиностроители. Они исследуют деградацию и деструкцию материи в условиях эксплуатации ХТС (коррозию, адгезию, абразивный износ, циклические нагрузки и старение, рост неоднородностей в материалах, изменение прочностных свойств). Здесь исследователи обслуживают конструкторов, вооруженных теорией сопротивления материалов и занимающихся только разрушением аппарата. Речь идет лишь о механической надежности.

Отметим характерную особенность этих исследований. Изучение процессов деградации и деструкции материи в условиях эксплуатации ХТС дает рекомендации в характерном масштабе времени – годы. Однако практика эксплуатации многих ХТС показывает, что отказы происходят чаще, когда процессы

деградации и деструкции еще и не начинались. Следовательно, обнаруживается необходимость исследовать надежность в других, более малых масштабах времени.

Для одной промышленной крупнотоннажной установки пришлось создать физико-математическую модель динамики процессов. Обработка этой модели методами обобщенного анализа [2], точнее, методом теории натуральных масштабов [3], показала, что натуральные масштабы времени  $\tau\#$  всех процессов в ХТС находятся в интервале от  $10^{-3}$  до  $10^3$  с. Следовательно, при ступенчатом изменении кого-то внешнего воздействия за несколько часов ( $10^3$  с) ХТС придет в новое стационарное состояние. Более быстрые процессы за время  $10^3$  с уже завершатся. Следовательно, теория параметрической надежности должна рассматриваться именно в этом масштабе времени – часы.

Предлагаемый метод исследования надежности ХТС основан на двух предпосылках. Первая – метод не рассматривает, не учитывает организационно-социальные причины отказов ХТС. Вторая предпосылка – физико-химико-процессная математическая модель ХТС (далее просто модель) разрабатывается в стационарном приближении (см. рис. 2).

При  $\tau < a$  в ХТС было стационарное состояние А. При  $\tau < b$  реализовалось новое стационарное состояние В. Время перестройки состояния ХТС  $b - a = (3 - 5)\tau\#$ , где  $\tau\#$  – максимальный по величине натуральный масштаб времени ХТС. Итак, стационарность рассмотрения процессов в ХТС означает рассмотрение состояний А и В и исследование заданных параметров в этих состояниях.

На самом деле, понятие стационарности ХТС требует более глубокого и детального осмысления. Действительно, рассмотрим ситуацию, при которой удалось разработать адекватную модель динамики

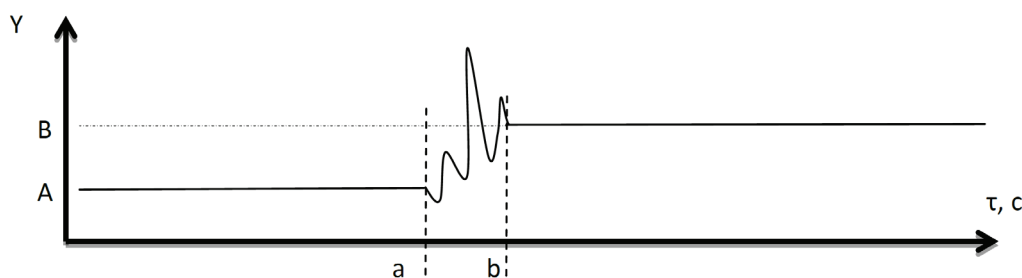


Рис. 2. Иллюстрация смысла стационарного рассмотрения состояний ХТС.

В точке  $a$  произошло ступенчатое изменение внешнего воздействия;  
в точке  $b$  – наступление нового стационарного состояния

всей ХТС с учетом автоматической системы управления (АСУТП). Применим к этой модели процедуру исследования устойчивости [4]. То есть, найдем координаты точек равновесия в фазовом пространстве (в том числе и на бесконечности), затем определим их локальную топологическую структуру. Среди всех точек равновесия могут быть грубые и негрубые состояния. Среди грубых – устойчивые и неустойчивые. Негрубые состояния имеют бифуркационный характер [5]: могут разваливаться на несколько грубых или просто исчезнуть из фазового пространства. Следовательно, получаем множественность состояний равновесия. Причем, часть из них физически не реализуется. Теоретически реализуются только грубые устойчивые состояния равновесия, причем каждое такое состояние характеризуется своим множеством начальных условий и своей траекторией пуска.

Таким образом, гипотеза о стационарном рассмотрении при построении модели ХТС имеет следующий смысл: известны координаты номинальной грубой устойчивой точки равновесия, известны начальные условия и траектория достижимости этой точки равновесия.

### Концепция метода исследования работоспособности ХТС

1. Система производства сырья, полупродуктов, предметов потребления в сочетании с социально-организационной системой образуют ту макросистему, внутри которой разрабатывается и будет функционировать ХТС.

2. Макросистема возмущает ХТС на всех ее жизненных стадиях от разработки до демонтажа. Эти возмущения рассматриваются как поле элементарных, случайных событий.

3. Количественные параметры качества ХТС (работоспособность, себестоимость, прибыль, норма прибыли, экологическая безопасность и т.д.) объявляются сложными случайными событиями над полем элементарных.

4. Химико-технологическая установка рассматривается как система. Системные свойства ее, их влияние на поведение частей, характер взаимодей-

ствия самих частей установки будем распознавать путем моделирования и численного эксперимента.

### Алгоритм метода исследования надежности ХТС

**I блок** – сбор исходной информации. Здесь под исходной минимально необходимой информацией понимаются документы: или «Исходные данные для проектирования», или «Химико-технологический регламент» и пр.

**II блок** – изучение регламента и установление множества заданных параметров.

Составление таблицы заданных параметров со столбцами: №№, наименование и физический смысл, обозначение в модели, размерность в СИ, номинальное значение, разрешенный интервал отклонений, ссылка на источник информации.

На практике исследования действующих и проектируемых промышленных ХТС оказалось, что число заданных параметров  $\sim 10^1$ .

**III блок** – разработка модели для каждого технологического передела и аппарата. Начинать следует с записи законов сохранения. Модель должна быть замкнутой, т.е. число уравнений в модели должно равняться числу искомым величин. Принципиальная особенность – все «выходы» из одной части ХТС делаются «входами» в следующий технологический передел или аппарат согласно технологической схеме. Выполнение этих правил делает всё множество моделей частей замкнутой моделью всей ХТС. Этим достигается необходимое условие корректности всей задачи.

**IV блок** – установление множества внешних воздействий. Рассматривая каждое уравнение, выделяем искомые величины (функции), остальные величины в уравнениях и образуют множество внешних воздействий.

Далее строится таблица внешних воздействий со столбцами: №№, наименование и физический смысл, обозначение в модели, размерность в СИ, номинальная величина, возможный интервал отклонений, источник информации.

На практике общее число внешних воздействий имело порядок  $10^2$ .

Всё множество внешних воздействий на ХТС можно условно разбить на три подмножества согласно их происхождению.

*Первое.* Сырьевые потоки и их параметры. Номинальная величина сырьевого потока в ХТС, конечно, известна из регламента. Однако точность подачи сырья определяется точностью дозатора. Класс точности дозатора устанавливают разработчики КИПиА на основании ТЗ технологов. Для нас важно лишь то, что при пусковых работах и в период эксплуатации ХТС массовый расход сырья случаен, его среднее значение и дисперсия известны.

Одновременно случаен состав сырьевого потока и его параметры: влажность, химический состав, дисперсность, пористость и т.д.

В эту же группу внешних воздействий включаем и энергетические потоки в ХТС: расход и состав природного газа, мазута, угля. Практика эксплуатации ХТС богата случаями, когда в установку подают вначале тюменский газ, затем газ из Астрахани, или разные их смеси, причем зачастую никто даже не предупреждает операторов ХТС об этом, а установки приходят в состояние отказа.

Точно так же изменяются параметры водяного пара, подаваемого для технологических нужд: меняется давление пара, его состояние (перегретый, насыщенный или влажный пар), температура. Аналогично обстоят дела с параметрами оборотной воды завода, где будет установлена ХТС.

В эту же группу внешних воздействий включаем параметры электроснабжения ХТС: скачки напряжения, частоты тока, отсутствие энергоснабжения.

*Второе.* Габарит. Линейные размеры, площади и объемы для тепло-массопереноса. При изготовлении оборудования на машиностроительном заводе действительные геометрические параметры отличаются от указанных в рабочей документации, в лучшем случае в пределах, определенных в нормативах и ГОСТах, в худшем значительно больше. И эти отличия являются обычными внешними воздействиями.

Существует еще одно обстоятельство, увеличивающее число внешних воздействий: для снижения капитальных затрат разработчики ХТС стараются как можно чаще использовать стандартные виды оборудования, которые серийно, а потому достаточно дешево, изготавливают машиностроительные заводы. Это стремление особенно широко реализуется для теплообменной аппаратуры. Здесь сначала рассчитывается поверхность теплообмена, удовлетворяющая требованиям химиков-технологов, а затем устанавливается стандартный теплообменник с большей ближайшей поверхностью, в «запас».

В современной ХТС не менее 35-40% капита-

ловложений составляют именно теплообменники [6], причем в большинстве устанавливается завышенная поверхность теплообмена. Конечно, это возмущает параметры технологического потока, отклоняет их от номинальных значений.

*Третье.* Информационный шум. Неточность, неопределенность научно-исследовательской информации.

В эту подгруппу внешних воздействий следует включить, прежде всего, весь комплект маршрутов химических реакций, которые экспертно определил химик-технолог. Ясно, что при другом выборе комплекта маршрутов меняется вся основа ХТС, т.е. концентрации компонентов в технологическом потоке, тепло-массовыделение, скорость превращений, теплофизические свойства и т.д. Отметим, что из опыта работы авторов не известно ни одного факта разработки однотипных ХТС с разными вариантами комплекта маршрутов химических и фазовых превращений. Этот комплект один раз экспертно назначается, и далее запускается вся огромная машина разработки и создания ХТС.

В третью группу внешних воздействий входит экспериментальная погрешность определения величины и зависимости констант равновесия от термодинамических параметров состояния для каждой реакции из общего комплекта маршрутов, предэкспоненты и энергии активации, если пользуются уравнением Аррениуса, а также величин энерговыделений (поглощений) в каждой реакции.

В третью группу также включаем неопределенность научной информации, которую генерируют специалисты по процессам и аппаратам химической технологии. Действительно, точность определения коэффициентов теплоотдачи при конвективном переносе в гомогенных средах оказывается не лучше 20-30%, при фазовых переходах (кипение или конденсация) не лучше 50-100%. Отсюда понятна цена расчетной поверхности теплообмена и стремление перестраховываться при выборе стандартного теплообменника. Проблема фазовых переходов для многокомпонентных систем является одной из самых сложных и мало познанных в химической технологии. При чтении монографий создается впечатление, что всё от всего зависит и всё со всем взаимодействует, однако инженерное использование теорий не приводит к добротным количественным зависимостям. Следовательно, погрешность велика и заставляет включать параметры этих зависимостей в общий список внешних воздействий.

Аналогично обстоит дело в гидравлике: точность определения местных коэффициентов сопротивления и коэффициентов трения не превышает 40%. Точность построения характеристик тяго-дутьевого и насосного оборудования в заводских условиях также невелика, а значит и их аппроксимация в виде

полиномов, необходимая для разработки модели гидродинамики ХТС, тоже крайне неточна.

**V блок** – разработка алгоритма и программы расчета на ПК каждого заданного параметра в функции от всех внешних воздействий.

**VI блок** – проверка адекватности модели, алгоритма расчета заданных параметров и программы на ПК. Для действующих ХТС можно утверждать адекватность в случае количественного совпадения рассчитанных на ПК и измеренных величин с точностью до КИПиА завода. Для проектируемых ХТС можно утверждать адекватность модели, если наблюдается количественное совпадение каких-то рассчитанных величин и тех же величин в регламенте.

**VII блок** – разработка программы расчета функционалов для комплектов случайных внешних воздействий. Проведение процедуры случайных испытаний типа Монте-Карло.

Благодаря опыту практического применения метода исследования надежности ХТС были выявлены наиболее интересные и актуальные результаты для химиков-технологов и разработчиков химико-технологических регламентов:

1. Применение метода исследования надежности к нескольким действующим или проектируемым промышленным ХТС показало, что вероятность работоспособности  $P_{\text{ХТС}}$  всегда была меньше 0.5 [7]. Заметим, что для любой ХТС существует такая вероятность работоспособности  $P_{\text{ХТС}}$ , меньше которой создание ХТС экономически нецелесообразно.

2. Рассмотренный выше метод исследования надежности ХТС позволяет количественно оценить качество разработки только химиков-технологов, т.е. рассчитать оценку  $P_{\text{ХИМ}}$ . Делается это просто алгоритмически – считая, что процессы переноса и оборудование не являются причиной отказа ХТС.

Если понимать, что химики-технологи первыми приступают к созданию технологии, к разработке технологической схемы, то очевидно  $P_{\text{ХТС}} < P_{\text{ХИМ}}$ . Учет еще заданных параметров процессной природы и специфики применяемого оборудования только уменьшат вероятность работоспособности по сравнению с  $P_{\text{ХИМ}}$ . Этим обстоятельством показывается доминирующая роль химиков-технологов в создании надежных ХТС [8].

3. В старых [9] и современных учебниках по «Общей химической технологии» [10, 11] ни разу не встречается слово надежность. Только в [12] один раз упоминается этот термин во введении. Следовательно, в среде химиков-технологов распространено заблуждение, что химическая технология не имеет никакого отношения к надежности ХТС.

В 1992 году научная общественность и инженерный корпус технологов получили возможность познакомиться с книгой [13] ученых и преподавателей

МИТХТ им. М.В. Ломоносова. В [13] постулируется: «Задачи создания и совершенствования производства основного органического синтеза должны решаться на основании системного подхода, базирующегося на рассмотрении изучаемого объекта во взаимосвязи с окружающими его объектами.», «...системный подход дает возможность при создании и проектировании любого производства рассматривать его как целое, когда разрабатываются и проектируются его части, а также выбрать способ соединения этих частей». Следовательно, авторы [13] декларируют, ЧТО делать, а предлагаемый нами метод исследования надежности ХТС говорит, КАК делать.

В [13] авторы представили целую главу – «Системные закономерности в технологии основного органического синтеза». Последние два параграфа этой главы имеют название: «Надежность работы отдельных аппаратов и химико-технологических систем» и «Оценка работоспособности системы».

В этих параграфах авторы пользуются терминологией и методом элементного подхода [14, 15], т.е. классическим приемом расчета вероятности отказа ХТС через отказы «взаимно-независимых» частей. В монографии [7, с. 35–39] показано, что элементный подход явно не корректен по множеству причин, в числе которых невозможность поиска исходных данных для его корректного применения, а также принимаемая авторами [14–18] взаимная независимость частей отвергается законами сохранения и постулируемым авторами [13] системным подходом. Авторы [13], к сожалению, не заметили публикации в 1981 году первой статьи по данному методу исследования [19] и статьи в журнале «Теоретические основы химической технологии» в 1989 году [20] по тематике надежности ХТС.

4. На интуитивном уровне понимания соотношения экономической эффективности без учета остановок и надежности становится очевидна антагонистичность этих категорий. Более того, применение методики исследования надежности показало, что во всех исследованных случаях чем больше расчетная эффективность, тем меньше показатель надежности.

С одной стороны, создавать ненадежные установки бессмысленно, так как не будет никакой эффективности, кроме затрат ресурсов и времени. С другой стороны, производство не должно быть убыточным. Необходим какой-то компромисс. Достижение компромисса предлагает метод исследования надежности ХТС. Действительно, выше показано, что можно рассчитать оценку любого функционала от параметров ХТС. Выберем в качестве такого функционала себестоимость целевого продукта ХТС. Более того, не очень сложно в этом случае выяснить, какие внешние воздействия и какие заданные пара-

метры более всего увеличивают себестоимость. Это позволяет посредством метода исследования надежности управлять себестоимостью продукта.

Здесь же заметим, что расчет себестоимости в современных проектных организациях не корректен, так как не учитывает затраты на ремонт после отказа ХТС и уменьшение годовой производительности продукта из-за простоев или брака. Исходя из определения [21], запишем формулу себестоимости:

$$CC = \text{ВСЕ ЗАТРАТЫ} / \text{КОЛИЧЕСТВО ПРОДУКТА ЗА ГОД}$$

Следовательно, актуальная себестоимость на этапе проектирования может быть определена только если в затраты включить стоимость аварий и простоев, а из количества продукта вычесть недополученный в результате остановок или брака продукт. Итоговая формула в этом случае:

$$CC = (\text{ВСЕ ЗАТРАТЫ (расчетные)} + \text{СТОИМОСТЬ АВАРИЙ}) / (\text{КОЛИЧЕСТВО ПРОДУКТА ЗА ГОД (расчетное)} - \text{ПОТЕРИ ОТ АВАРИЙ})$$

Представленный в [3] метод улучшения надежности, основанный на представленном методе исследования, примененный к ХТС, может позволить увеличить надежность, что приведет, с одной стороны, к росту капитальных затрат, с другой стороны, произойдет уменьшение затрат на ликвидацию последствий аварийных ситуаций и уменьшатся потери продукции от аварий. Причем, чем сильнее растет показатель надежности, тем больше увеличиваются суммарные затраты (капитальные в виде амортизации, а также текущие расходы). Это значит, что вначале с увеличением надежности себестоимость будет уменьшаться за счет сокращения потерь и затрат на аварии, но в какой-то момент увеличение показателя надежности начнет приводить лишь к росту себестоимости. То есть существует минимум актуальной себестоимости, и он достижим.

#### Список литературы:

1. ГОСТ 27.002-93. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандарт-информ, 2011. 27 с.
2. Гухман А.А., Зайцев А.А. Обобщенный анализ. М.: Факториал, 1998. 304 с.
3. Прохоренко Н.Н. Метод натуральных масштабов. Приложение к научно-исследовательским и инженерным задачам. Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2006. 186 с.
4. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Качественная теория динамических систем второго порядка. М.: Наука, 1966. 568 с.
5. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Теория бифуркации динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1967. 487 с.

5. На первый взгляд, описание алгоритма метода исследования надежности ХТС кажется достаточно сложным. Действительно, практика применения метода к промышленным крупнотоннажным ХТС показывает, что процедура метода довольно трудоемка и очень наукоемка. Работники самых разных специальностей должны быть самой высокой квалификации и большой эрудиции, но главное – они должны иметь навык математической формализации своих знаний.

#### Выводы:

1. Необходимо различать механическую и технологическую надежность ХТС. Безусловно, важность обеих колоссальна, но надежность системы в одном из этих смыслов не гарантирует надежность в другом.
2. Не так давно в научной и инженерной среде осознана необходимость расчета надежности ХТС и системного подхода к этому вопросу. К сожалению, конвенциональные методы не позволяют корректно осуществить подобный расчет. В статье приводится методика, позволяющая это сделать.
3. Расчет вероятности работоспособности ХТС позволяет на предпроектной стадии заведомо обнаруживать неработоспособные технологии.
4. В статье впервые показано, что для каждой ХТС существует показатель надежности, ниже которого реализация ХТС экономически нецелесообразна.
5. Кроме того, впервые в статье отражено наличие минимума актуальной себестоимости и возможность достичь этого минимума в соответствии с методом увеличения надежности, представленным в [3].
6. Необходимо вводить изучение технологической надежности в учебный процесс подготовки магистров, обучающихся по направлению «Химическая технология», в качестве отдельного курса.

#### References:

1. GOST (State Standard) 27.002-93 «Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya» («Reliability in Technology Field. Terms»). M. Srandartinform, 2011. 27 p.
2. Gukhman A.A., Zaitsev A.A., Obobshchennyj analiz (Generalized Analysis). M.: Faktorial, 1998. 304 p.
3. Prokhorenko N. Metod natural'nykh masshtabov. Prilozhenie k nauchno-issledovatel'skim i inzhenernym zadacham (Natural scales method). Kaluga: N.F. Bochkarevoy Publ., 2006. 186 p.
4. Andronov A., Leontevich E., Gordon I., Mayer A. Kachestvennaya teoriya dinamicheskikh sistem vtorogo poryadka (Qualitative Theory of Second-order Dynamic Systems). M.: Nauka, 1966. 568 p.
5. Andronov A., Leontevich E., Gordon I., Mayer

6. Лесохин Е.И., Рашковский П.В. Теплообменники-конденсаторы в процессах химической технологии: моделирование, расчет, управление. Л.: Химия, 1990. 288 с.
7. Прохоренко Н.Н. Надежность химико-технологических систем. Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2010. 222 с.
8. Prokhorenko N.N. // Chemical and Petroleum Engineering. 2006. V. 42. № 9. P. 592–596.
9. Бесков В.С., Сафонов В.С. Общая химическая технология и основы промышленной экологии. М.: Химия, 1999. 469 с.
10. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанян А.Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2-х кн. / Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Университетская книга, Логос, Физматкнига, 2006. Кн. 1. 912 с.
11. Process Understanding: For Scale-Up and Manufacture of Active Ingredients / Ed. I. Houson. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. 351 p.
12. Кутепов А.М., Бондарева Т.И. Беренгарден М.Г. Общая химическая технология. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 469 с.
13. Тимофеев В.С., Серафимов Л.А. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. М.: Химия, 1992. 452 с.
14. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Грун Г., Нойман В. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств. М.: Химия, 1987. 272 с.
15. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Надежность оборудования и технологических схем химических и нефтехимических производств // Итоги науки и техники. Сер. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 7. М.: ВИНТИ, 1979. 130 с.
16. Gruhn G., Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Neuman W. Zuverlässigkeit vor Chemieak – lagen, Leipzig: Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1979.
17. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П., Игнатов В.Н. // Теор. основы хим. технологии. 1977. Т. XI. № 1. С. 3–10.
18. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П., Игнатов В.Н. // ДАН СССР. 1974. № 5.
19. Михайлов В.В., Прохоренко Н.Н., Романенко Н.Я., Черняев Ю.И. // Сб. научных трудов (Химическое машиностроение) «Оборудование технологических линий для производства минеральных удобрений и сырья для них». М.: НИИХИММАШ, 1981. С. 32–39.
20. Прохоренко Н.Н., Лекае А.В. // Теор. основы хим. технологии. 1989. Т. XXIII. С. 135–138.
21. Грищенко О.В. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 112 с.
- A. Teoriya bifurkacii dinamičeskikh sistem na ploskosti (Bifurcation Theory of Dynamic Systems on Plane). M: Nauka, 1967. 487 p.
6. Lesokhin E.I., Rashkovski P.V. Teploobmenniki-kondensatory v processakh khimicheskoy tekhnologii: modelirovanie, raschet, upravlenie (Condenser Type Heat Exchangers in Chemical Engineering Processes: Modeling, Calculation, Control). Leningrad: Khimiya, 1990. 288 p.
7. Prokhorenko N. Nadezhnost' khimiko-tekhnologicheskikh system (Reliability of Chemical Engineering Systems). Kaluga: N.F. Bochkarevoy Publ., 2010. 222 p.
8. Prokhorenko N.N. // Chemical and Petroleum Engineering. 2006. V. 42. Iss. 9. P. 592–596.
9. Beskov V.S., Safonov V.S. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya i osnovy promyshlennoj ehkologii (Chemical Technology in Common and Industrial Ecology Basics). M.: Khimiya, 1999. 469 p.
10. Ainshtein V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. [et al.] Obshchij kurs processov i apparatov khimicheskoy tekhnologii (Main Course Book of Process and Apparatus of Chemical Technology): in 2 books / Ed. by V.G. Ainshtein. M.: Universitetskaya kniga, Logos, Fizmatkniga, 2006. Book 1. 912 p.
11. Process Understanding: For Scale-Up and Manufacture of Active Ingredients / Ed. I. Houson. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. 351 p.
12. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengarden M.G. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya (Chemical Technology in Common: Course Book). M: Akademkniga, 2003. 469 p.
13. Timofeev V.S., Serafimov L.A. Principy tekhnologii osnovnogo organicheskogo i neftekhimicheskogo sinteza (Principles of Main Organic Synthesis and Petroleum Synthesis Technologies). M.: Visschaya shkola, 2003. 536 p.
14. Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Grun G., Noiman V. Obespechenie i metody optimizacii nadezhnosti khimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv (Providing and Optimizational Methods of Chemical and Petroleum Plants Reliability). M: Khimiya, 1987. 272 p.
15. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Reliability of Devices and Technological Systems of Chemical and Petroleum Plants // Itogi nauki i tekhniki (Results of Science and Engineering). Series «Process and apparatus of chemical technology». V. 7. M.: VINITI, 1979. 130 p.
16. Gruhn G., Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Neuman W. Zuverlässigkeit vor Chemieak – lagen, Leipzig: Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1979.
17. Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P., Ignatov V.N. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 1977. V. XI. № 1. P. 3–10.
18. Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P., Ignatov V.N. // Doklady Akademii Nauk SSSR (Proceedings of USSR Academy of Sciences). 1974. № 5.
19. Mikhailov V.V., Prokhorenko N.N., Romanenko

N.Ya., Chernyaev Yu.I. // Scientific proceedings (Mechanical Engineering for Chemical Technology) «Apparatus for Technologies of Mineral Fertilizers and Their Raw Materials». M: NIIKhIMMASH, 1981. P. 32–39.

20. Prokhorenko N.N., Lekae A.V. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 1989. V. XXIII, P. 135–138.

21. Grischenko O.V. Analiz i diagnostika finansovo-khozyajstvennoj deyatel'nosti predpriyatiya (Analysis and diagnostics of company's financial state: course book). Taganrog: TRTU Publ., 2000. 112 p.