

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.03

УДК 004.896

А.А. Пименов, Е.А. Муравьева, И.Ф. Каримов

Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета,
Институт химических технологий и инжиниринга,
Стерлитамак, Россия

КОНТРОЛЬ ЗАКОКСОВАННОСТИ ЗМЕЕВИКА ТРУБЧАТЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВОДОРОДА ПАРОВОЙ КОНВЕРСИЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Объектом исследования данной работы служат трубчатые нагревательные печи, которые на сегодняшний день находятся среди опасных объектов на нефтегазовом производстве, так как при проведении анализа на предприятиях была выявлена высокая доля аварий, связанных с прогаром в зонах внутренних отложений и, как следствие, разгерметизации змеевиков, их деформации и возникновения взрывов и пожаров в дальнейшем. Для того чтобы увеличить срок службы змеевиков, повысить надежность печи, контролировать коксообразование в ней и таким образом уменьшить возникновение аварий на производстве, необходимо разработать систему автоматического управления закоксованностью змеевика трубчатой печи с использованием генетических алгоритмов. **Цель исследования:** разработка автоматической системы управления закоксованностью змеевика трубчатой печи при производстве водорода паровой конверсией на основе генетических алгоритмов. **Методы:** построение системы, моделирующей контроль закоксованности трубчатых печей путем поддержания температуры, не превышающей пределы, при которых на змеевиках печи образуется кокс. Для количественной оценки уровня закоксованности змеевиков трубчатых печей в режиме реального времени предложен оценочный критерий – скорость коксообразования, формируемый из совокупности технологических и технических параметров с использованием эмпирических зависимостей генетического алгоритма, определено значение оценочного критерия (более 0,8 кг/сут), соответствующее предельно допустимому уровню закоксованности змеевика трубчатой нагревательной печи. **Результаты:** в процессе исследования проблемы повышения закоксованности змеевика трубчатых нагревательных печей в производстве водорода паровой конверсией использовались генетические алгоритмы для построения систем со сложным поведением, так как данный метод является относительно простым для реализации, также предложена модель ПИД-регулирования с их использованием, смоделированная в среде «Simulink» в программе «MatLab». **Практическая значимость:** в результате исследования решена актуальная проблема повышения уровня пожарной и промышленной безопасности трубчатых печей путем построения системы, моделирующей контроль закоксованности трубчатых печей на производстве.

Ключевые слова: печь, контроль, закоксованность, разработка, генетический алгоритм, температура, давление.

A.A. Pimenov, E.A. Muravyova, I.F. Karimov

Branch of the Ufa State Oil Technical University, Institute of Chemical Technology
and Engineering, Sterlitamak, Russian Federation

COIL CONTROL OF TUBULAR HEATING FURNACES IN HYDROGEN PRODUCTION BY STEAM CONVERSION BASED ON GENETIC ALGORITHMS

The object of the study of this work are tubular heating furnaces, which today are one of the dangerous objects in oil and gas production, since during the analysis at the enterprises a high proportion of accidents associated with nporapom in the zones of internal deposits and, as a consequence, the depressurization of coils, their deformation and the occurrence of explosions and fires in the further. In order to increase the service life of coils, increase the reliability of the furnace, control the coke formation of it and, thus, reduce the occurrence of accidents in production, it is necessary to develop a system for automatic control of the coking of the coil of a tubular furnace using genetic algorithms. **Purpose:** development of an automatic control system for coking the coil of a tubular furnace in the production of hydrogen by steam conversion based on genetic algorithms. **Methods:** construction of a system simulating the control of coking of tubular furnaces by maintaining a temperature not exceeding the limits at which coke is formed on the coils of the furnace. To quantify the level of coking of tubular coils of furnaces in real time, an evaluation criterion is proposed – the rate of coke formation, formed from a set of technological and technical parameters using empirical dependencies of a genetic algorithm, the value of the evaluation criterion (more than 0,8 kg / day) corresponding to the maximum permissible level of coking of the coil of a tubular heating furnace is determined. **Results:** in the process of investigating the problem of increasing the coking of the coil of tubular heating furnaces in the production of hydrogen by steam convection, genetic algorithms were used to build systems with complex behavior, since this method is relatively simple to implement, and a model of PID regulation with their use was also proposed, modeled in the "Simulink C" environment in nporpamme "Matlab". **Practical relevance:** as a result of the research, the actual problem of increasing the level of fire and industrial safety of tubular furnaces has been solved by building a system that simulates the control of coking of tubular furnaces in production.

Keywords: furnace, control, coking, development, genetic algorithm, temperature, pressure.

Введение

В данной статье для возможности контролировать образование кокса в змеевиках трубчатых нагревательных печей были разработаны генетические алгоритмы, необходимые для поддержания температуры, не превышающей пределы, при которых происходит коксообразование. Трубчатые печи являются важным элементом современного нефтегазового производства, они служат для высокотемпературных преобразований нагрева и химических реакций превращения жидких и газообразных углеводородов, в то же время они находятся среди наиболее опасных производственных объектов, на их долю приходится значительное количество аварийных отказов. По данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору,

с 2007 по 2017 г. от всего количества аварий, приходящихся на трубчатые нагревательные печи на предприятиях нефтегазовой отрасли, 85 % связаны с пожарами и взрывами [1, 2].

Причинами аварий в трубчатых нагревательных печах являются: разгерметизация змеевика, которая может привести к пожару в печи; погасание горелок, которое может привести к взрыву в печи; разгерметизация наружного оборудования печи, которое может привести к взрыву снаружи печи [3, 4]. Один из известных способов обеспечения промышленной и пожарной безопасности трубчатых нагревательных печей – это применение систем аварийно-предупредительной сигнализации (АПС) и противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ), которые должны предупреждать и предотвращать аварийные ситуации, возникающие вследствие ошибочных действий работников или при сбоях в работе оборудования [5].

В системах АПС и ПАЗ применяются специальные сертифицированные датчики, исполнительные устройства, измерительные приборы, а также программируемые контроллеры. Для очистки трубчатых печей от коксоотложений используется несколько способов: механический способ очистки с использованием турбинок или шарошек, паровоздушный способ и способ отслаивания, но данные методы требуют значительных затрат времени и ручного труда, оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду, а также велика опасность перегрева труб выше температуры предела текучести металла, что приводит к преждевременному их износу, прогарам и выбраковке [6].

В свою очередь, в данной области были проведены исследования по решению проблемы закоксованности трубчатых нагревательных печей методом внедрения фиксирующей проставки в конструкцию змеевика и методом использования скреперов, но большинство из них требует остановки всей установки.

В данной работе рассматривается способ уменьшения аварий на производстве методом повышения надежности в трубчатых нагревательных печах, с увеличением срока службы змеевиков, так как именно на них приходится колоссальные нагрузки и деформации, связанные с закоксованностью и прогаром в зонах внутренних отложений. В статье представлена система автоматического регулирования закоксованности змеевика в трубчатых нагревательных печах при производстве водорода методом паровой конверсии. Данная система смодели-

лирована в среде «Simulink» в программе «MatLab». Контроль закоксованности будет осуществляться ПИД-регулятором, коэффициенты (P, I, D) для которого автоматически подбираются с помощью генетических алгоритмов, которые являются признанным инструментом для оптимизации процессов. Наиболее популярным применением генетических алгоритмов является оптимизация многопараметрических функций. Генетические алгоритмы имеют следующие отличия:

- алгоритм оптимизационной задачи работает с закодированными параметрами;
- при решении задачи оптимизации используется непосредственно целевая функция с целью определить «вектор движения поиска» и качественно сравнить альтернативные решения;
- поиск улучшения решений осуществляется в соответствии с несколькими альтернативами;
- выбор генетических операторов опирается на использование понятия вероятности [7–9].

Преимущества генетических алгоритмов:

- универсальность;
- высокая обзорность поиска;
- отсутствие ограничений на целевую функцию;
- возможность любого способа задания функции [10, 11].

В данной статье генетические алгоритмы были выбраны как метод управления технологическим процессом для того, чтобы избежать аварий и увеличить срок службы трубчатой печи при производстве водорода методом паровой конверсии. Дело в том, что для оптимальной работы генетического алгоритма необходимо время для проведения большего количества итераций.

В данной системе происходит регулирование температуры, этот параметр по своей природе является инерционным. Для инерционных процессов системы регулирования с использованием генетических алгоритмов являются наилучшим вариантом.

Генетический алгоритм является достаточно точным, но долгим методом регулирования, таким образом, использование генетических алгоритмов для регулирования температуры позволяет проигнорировать их главный недостаток. Генетический алгоритм подбирает коэффициенты ПИД-регулятора, пока не придет к значению, которое необходимо для оптимального регулирования процесса.

1. Описание технологического процесса

В процессе производства водорода методом «паровая конверсия», рассматриваемом в данной работе, показан идеальный процесс, в котором не учитываются значения давления и внешние факторы, при моделировании на процесс образования кокса влияет только температура. На стадии риформинга в процессе производства водорода паровой конверсией десульфурированный газ смешивается с перегретым паром. Далее смесь проходит по катализаторным трубам в трубчатой нагревательной печи (рис. 1).

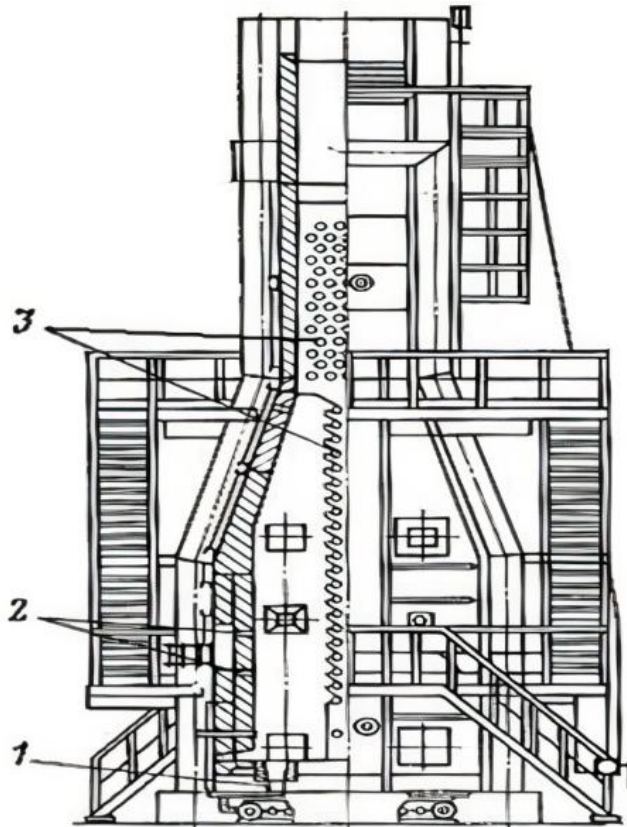


Рис. 1. Схема трубчатой печи типа ЗД: 1 – горелка, 2 – каналы для подвода воздуха, 3 – змеевики

В трубах этой печи углеводороды и пар дополнительно нагреваются в присутствии катализатора, выделяя водород, углекислый и угарный газы [12, 13]. Горячий технологический газ выходит с катализатором из трубок установки риформинга, нагретым до темпера-

туры около 850 °С, и поступает в парогенератор отходящих продуктов установки риформинга при температуре около 820 °С. В парогенераторе (Е-1) производится пар для процесса, а температура на выходе регулируется согласно заданной температуре на входе в блок конверсии СО (П-2).

В процессе производства при высоких температурах змеевик печи закоксовывается (рис. 2), при высоком уровне закоксованности змеевика вероятность возникновения аварии значительно возрастает. В целях предотвращения аварии и продления срока службы змеевика необходимо разработать систему, которая будет способна контролировать коксообразование в печи (табл. 1, 2).

Для решения описанной выше проблемы наиболее перспективным представляется использование генетических алгоритмов для изменения коэффициентов ПИД-регулятора с целью продления срока службы змеевика [15, 16]. Регулирование температуры (TRC) и давления (PRC) при помощи указанной системы поможет предотвратить аварии на производстве, а также продлить срок службы трубчатой печи. Обозначения трубчатой печи типа ЗД: З – зональной регулировкой теплоотдачи, Д – настильное с дифференциальным подводом воздуха.

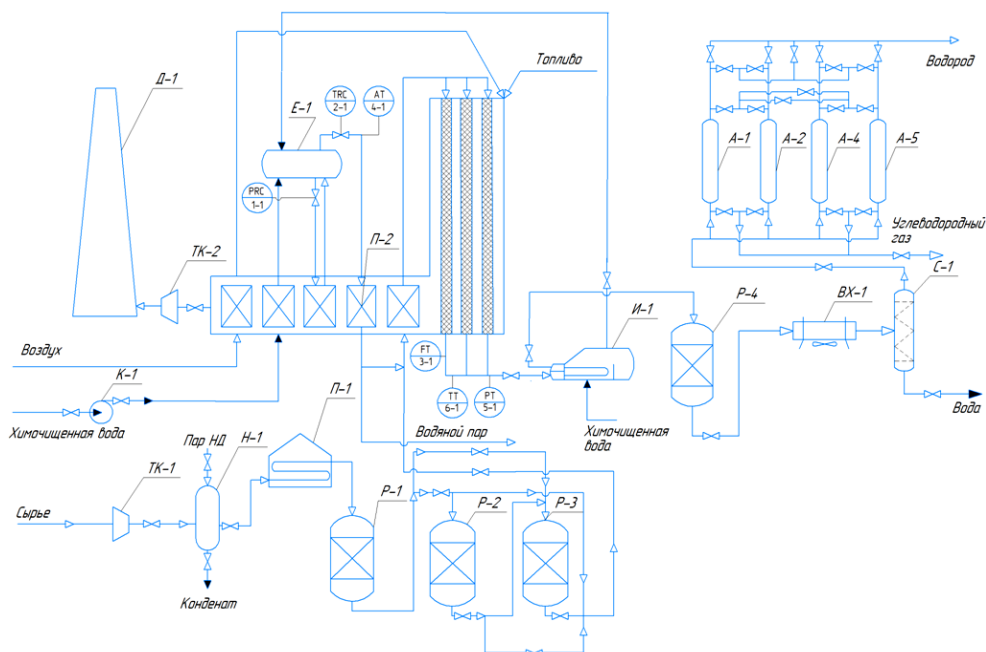


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации

Таблица 1

Перечень регулируемых параметров

Наименование измеряемой величины	Поз. на ФСА	Единица измерения	Пределы контроля
Температура на входе в печь	TRC 2-1	°С	800–1000
Давление на входе в печь	PRC 1-1	бар	0,1–1

Таблица 2

Перечень контролируемых параметров

Наименование измеряемой величины	Поз. на ФСА	Единица измерения	Пределы контроля
Температура на выходе из печи	TT 6-1	°С	800–1000
Давление на выходе из печи	PT 5-1	бар	0,1–1
Расход водяного пара	FT 3-1	кг/час	0–10
Плотность водяного пара	AT 4-1	кг/м ³	0–1000

2. Анализ причин и последствий аварийных ситуаций на технологических установках с трубчатыми печами

Если обобщить описанные причины возникновения аварий [17, 18] в трубчатых печах, то можно выделить следующие:

– технические: неудовлетворительное состояние технических устройств, сооружений, зданий; несовершенство технологического процесса или недостатки в конструкции трубчатой печи;

– организационные: нарушение технологии при производстве работ; неудовлетворительная организация ремонтных работ; ненадлежащий производственный контроль; умышленное отключение средств противоаварийной автоматической защиты; низкий уровень знаний у сотрудников в области техники безопасности и требований промышленной безопасности на предприятии; нарушение производственной дисциплины, неосмотрительные (запрещенные) действия сотрудников.

3. Определение зависимости закоксованности змеевика от температуры и давления в трубчатой печи

Как правило, системы АПС современных трубчатых нагревательных печей реагируют только на закоксовывание змеевика [19–21]. В данной работе предлагается улучшение системы АПС путем мониторинга параметра коксообразования – скорости коксообразования.

Очевидным является то, что более стабильная работа печи при увеличившемся рабочем пробеге является выгодной для предприятия как с точки зрения экономики, так и с точки зрения обеспечения пожарной и промышленной безопасности [22].

Полученное значение скорости коксообразования будет являться усредненной величиной ввиду того, что она не постоянна по длине змеевика. Резкое возрастание и достижение критической величины скорости коксообразования свидетельствуют о неоптимальном режиме работы трубчатой печи.

Для контроля коксообразования в трубчатой печи необходимо регулировать температуру (ТТ 6-1) при помощи нагревательного элемента, а также перепад давления (РТ 5-1) при помощи системы вентиляции. Изменение данных параметров поможет держать уровень закоксованности в норме для предотвращения аварий на производстве, а также для более значительной эксплуатации трубчатой печи. Более подробная информация о зависимости коксообразования от температуры и давления представлена в диссертации «Информационно-управляющая система обеспечения безопасности трубчатых печей с использованием генетических алгоритмов» А.М. Хафизова [23].

4. Моделирование в среде Simulink

На начальном этапе необходимо создать имитационную модель в среде Simulink, моделирующую процесс нагрева трубчатой печи. В блоке 2 (PID(s)) (рис. 3) заложен разработанный генетический алгоритм [14].

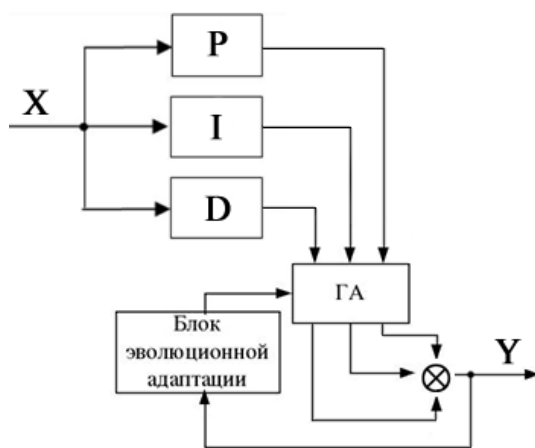


Рис. 3. Структурная схема ПИД-регулятора (блок 2)

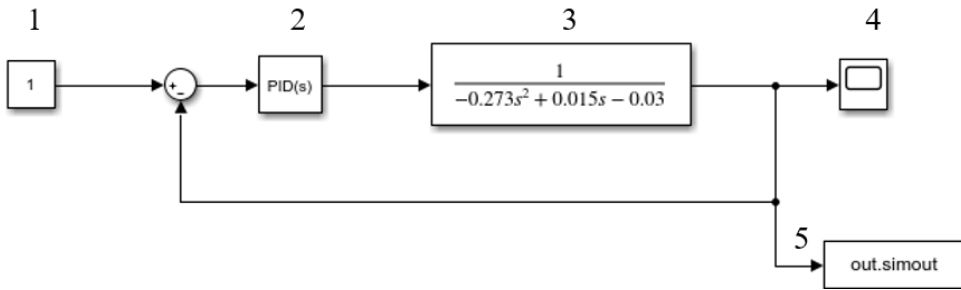


Рис. 4. Простейшая схема ПИД-регулирования в среде Simulink

В данной схеме (рис. 4) расположен только один ПИД-регулятор, регулирующий нагрев печи и, соответственно, сам нагреватель в качестве объекта управления.

При помощи графика на рис. 5 выставлено задание для генетических алгоритмов. График задания всегда выставляется на единицу [25, 26], чтобы можно было менять задание при помощи отдельного блока (блок 1), также выставляется минимальное время реагирования. Генетический алгоритм путем проведения множества итераций подбирает параметры ПИД-регулятора для того, чтобы соответствовать заданному графику. Задание выставляется минимальным временем реагирования ПИД-регулятора.

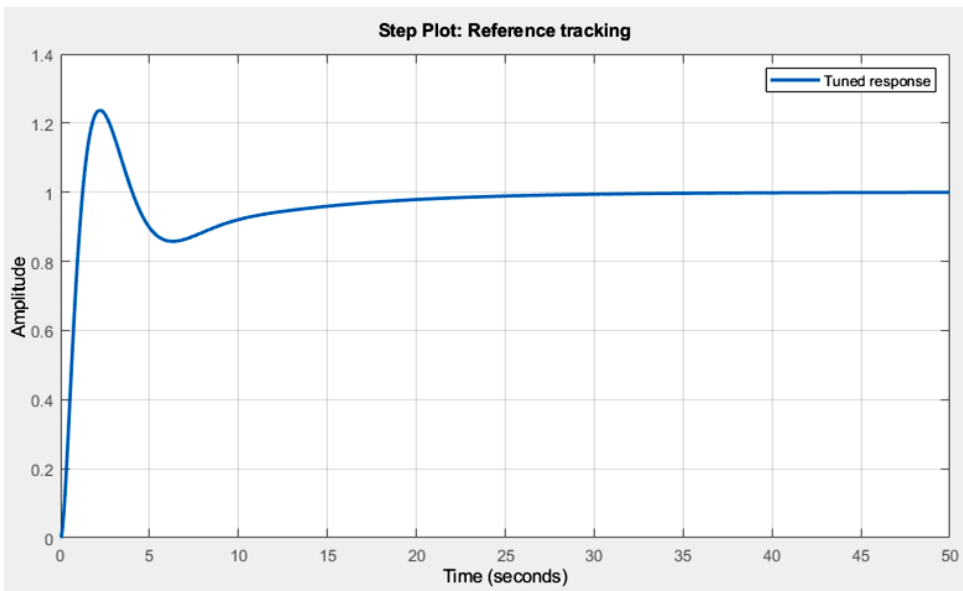


Рис. 5. Желаемый график передаточной функции регулирования температуры (TRC2-1)

Как видно из графика на рис. 6, реакция системы на изменение температуры ощутимо инерционна (180 мин). Но при помощи дифференциального подвода воздуха процесс можно ускорить. Для этого необходима каскадная система регулирования.

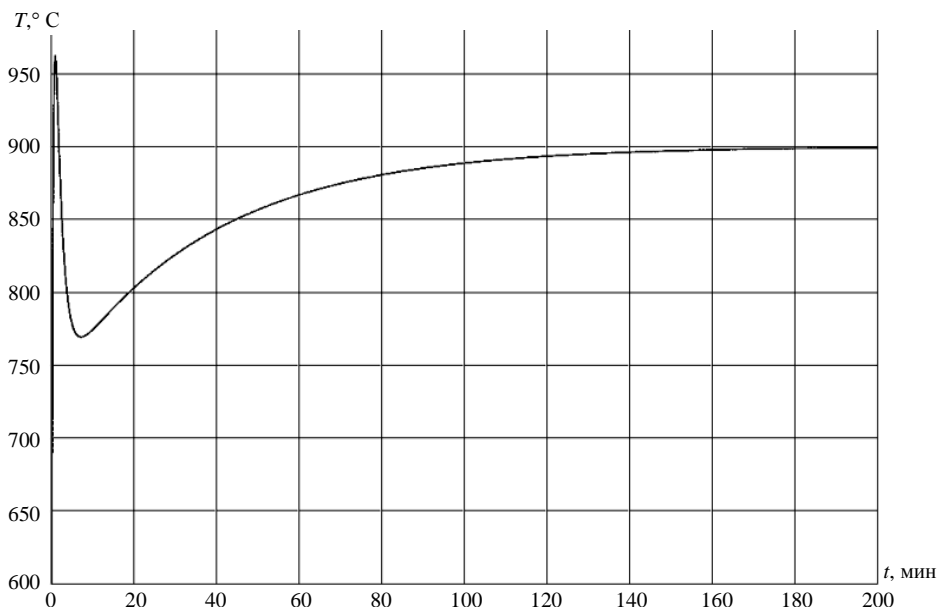


Рис. 6. График устойчивой системы с ПИД-регулятором для поз. TRC 2-1

В схеме на рис. 7 помимо первого ПИД-регулятора (блок 2) и объекта управления (блок 4) были добавлены клапан (блок 3), а также блок запаздывания объекта (блок 5), так как исследуемая система имеет определенную задержку сигнала. Клапан в данной модели представлен как обычный усилитель, значение которого установлено на 1, таким образом регулируется подача воздуха.

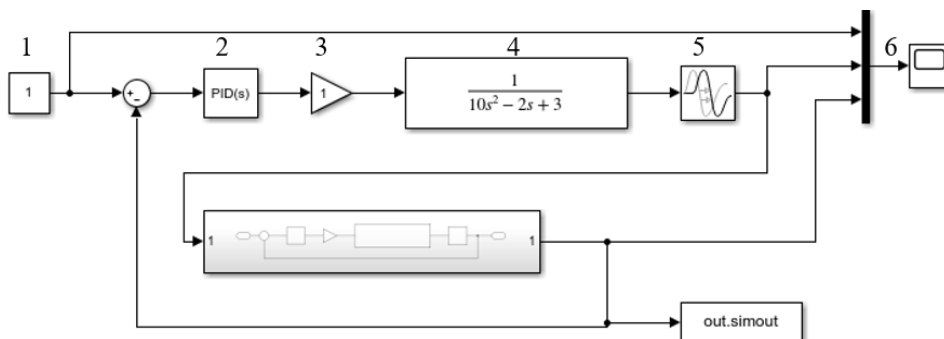


Рис. 7. График устойчивой системы с ПИД-регулятором для поз. TRC 2-1

Запаздывание объекта необходимо для правильного регулирования параметров, так как исследуемый объект имеет определенную задержку регулирования. Чем инертнее система, тем эта задержка больше. Задержка для регулирования температуры (TRC 2-1) выставляется в 40–60 мин. В блоке подсистемы (рис. 8) заложен ПИД-регулятор, подбирающий коэффициенты на основе генетических алгоритмов, клапан+привод (1), объект управления (система вентиляции), а также запаздывание объекта.

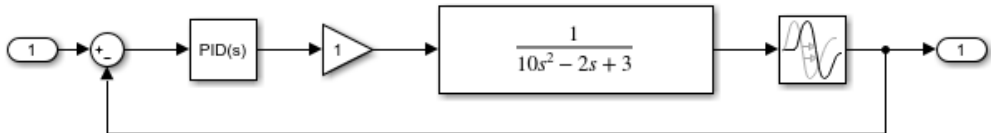


Рис. 8. Подсистема регулирования давления поз. PRC 1-1

Графики снимаются с «задания», в которое заложены требуемое значение температуры в печи после первого ПИД-регулятора и выходной сигнал после двух ПИД-регуляторов. Графики регулирования, полученные после применения генетических алгоритмов для подбора коэффициентов ПИД-регулятора, представлены на рис. 9.

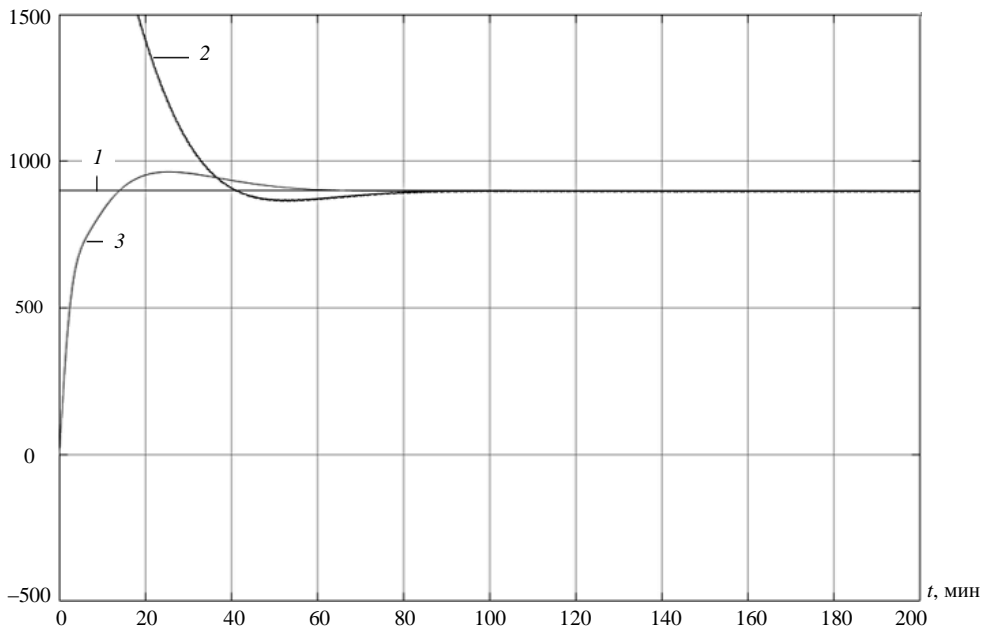


Рис. 9. Графики каскадной системы регулирования: 1 – выставленное задание в 900 °С, 2 – график передаточной функции в системе с одним ПИД-регулятором, 3 – конечный график каскадной системы регулирования

На графике видно (см. рис. 9), что каскадное ПИД-регулирование приходит к заданию в 900 °С через 80 мин, что в 2 раза меньше, чем при обычном. Поддержание температуры 900°С позволяет работать печи максимально эффективно, при этом не происходит минимальное коксообразование, таким образом, каскадное ПИД-регулирование на основе генетических алгоритмов позволяет контролировать коксообразование при помощи поддержания необходимого уровня температуры.

На рис. 10 дано сравнение графика каскадной системы регулирования и графика изменения температуры без регулятора.

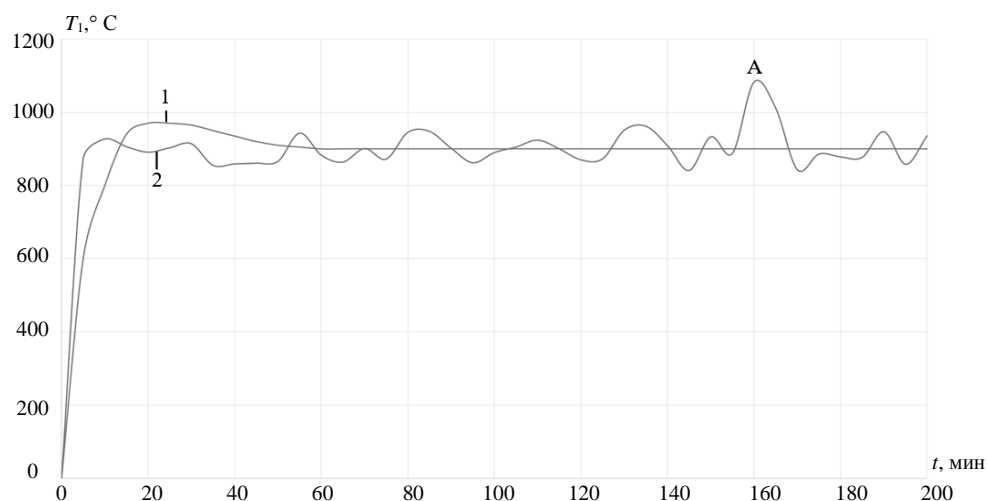


Рис. 10. Сравнение каскадной системы регулирования и графика изменения температуры без регулятора: 1 – график каскадной системы регулирования, 2 – график изменения температуры без регулятора

Из графика 2 видно, что без использования ПИД-регулятора температура в трубчатой печи изменяется нестабильно, что в итоге приводит к моментам повышенного коксообразования, что прослеживается в точке А. Данная нестабильность и закоксованность в конечном итоге и приводят к разгерметизации змеевиков, их деформации и возникновению взрывов и пожаров, поэтому использование генетических алгоритмов в данном случае является лучшим вариантом. При использовании каскадной системы регулирования (график 1) изменение температуры протекает стабильно, уровень коксообразования соответствует предельно допустимому уровню закоксованности змеевика трубчатой нагревательной печи. Данный метод является верным способом снижения доли опасности на объектах нефтегазового производства. Отсю-

да следует вывод, что использование генетических алгоритмов позволяет быстрее реагировать на изменение температуры и поддерживать уровень, не превышающий допустимого значения, что и служит средством, предотвращающим образование кокса.

Заключение

В работе решена актуальная проблема повышения уровня пожарной и промышленной безопасности трубчатых печей путем построения системы, моделирующей контроль закоксованности трубчатых печей за счет поддержания температуры, не превышающей пределы, при которых на змеевиках печи образуется кокс. Также предложены генетические алгоритмы для построения систем со сложным поведением. Представленная модель ПИД-регулирования с использованием ГА позволяет решить ряд проблем, связанных с повышенным коксообразованием на технологических производствах.

Главным преимуществом использованного регулятора является изменение параметров в реальном времени благодаря работе генетических алгоритмов.

Библиографический список

1. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 [Электронный ресурс]. – М., 2018. – URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (дата обращения: 07.01.2022).
2. Совершенствование систем автоматического управления и противоаварийной защиты трубчатых печей на основе мониторинга параметров процесса коксообразования / М.Г. Баширов, З.Х. Павлова, М.М. Закирничная, А.М. Хафизов // Нефтегазовое дело. – 2018. – № 1. – С. 120–144.
3. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: учебное пособие / С.А. Ахметов, Т.П. Сериков, И.Р. Кузеев, М.И. Баязитов. – СПб.: Недра, 2006. – 868 с.
4. Литяйкин Д.Ю., Муравьева Е.А. Разработка системы управления блока сепарации водородосодержащего газа // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации: сб. ст. II Всерос. науч.-практ. конф. – Белебей, 2021. – С. 46–48.

5. Система оперативного диагностирования автоматизированного технологического комплекса трубчатой печи на основе производственных правил [Электронный ресурс] / Д.С. Матвеев, А.В. Чикуров, М.Х. Хуснияров, А.П. Веревкин, Р.Н. Бахтизин // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал УГНТУ. – 2011. – № 4. – С. 4–13.

6. Абдрафикова Ф.Ф., Муравьева Е.А., Шарипов М.И. Использование модели машинного обучения для решения задач реального времени // Современные технологии: достижения и инновации-2021: сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф.; Стерлитамак, 16 ноября 2021. – Стерлитамак, 2021. – С. 327–329.

7. Тенев В.А. Решение задачи многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск: Изд-во Ижевск. гос. техн. ун-та, 2006. – № 2/8. – С. 103–109.

8. Сводная статистика пожаров в Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: <http://wiki-fire.org/Сводная%20статистика%20пожаров%20в%20Российской%20Федерации.ashx> (дата обращения: 07.01.2022).

9. Статистика пожаров в России [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pojarnayabezopasnost.ru/statistika.html> (дата обращения: 07.01.2022).

10. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. – URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 07.01.2022).

11. Веревкин А.П., Слетнёв М.С. Усовершенствованное управление (АРС) нефтехимическим производством на основе многоуровневой нейросетевой системы поддержки принятия решений // Нефтегазовое дело. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 61–64.

12. Пожарная опасность трубчатых печей [Электронный ресурс]. – URL: <http://mirznanii.com/a/195242-3/pozharnaya-opasnost-trubchatykh-reshche> (дата обращения: 07.01.2022).

13. Кузнецов Д.Л., Хафизов А.М., Малышева О.С. Экономическое обоснование разработки программы диагностирования змеевиков трубчатых печей // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 342–344.

14. Хафизов А.М., Баширов М.Г. Информационно-управляющая система обеспечения безопасности трубчатых печей с использованием генетических алгоритмов / УГНТУ. – Уфа, 2019. – С. 93.

15. Lankhorst M.M. A genetic algorithm for the induction of nondeterministic pushdown automata. computing science report / University of Groningen Department of Computing Science. – 1995.

16. Мищенко В.А. Коробкин А.А. Использование генетических алгоритмов в обучении нейронных сетей // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6.

17. Das S., Mozer M.C. A unified gradient-descent/clustering architecture for finite state machine induction // Advances in Neural Information Processing Systems. – 1994.

18. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization // Telkomnika. – 2013. – 11(3). – P. 1524–1530. – URL: <http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf> (accessed 31.03.2016).

19. Goldberg D.E. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning. – Reading, MA: Addison-Wesley. – 1989.

20. Goldberg D.E. Simple genetic algorithms and the minimal deceptive problem // Genetic Algorithms and Simulated Annealing. Chapter 6. – Los Altos, CA, Morgan Kaufman. – 1987. – P. 74–88.

21. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm // International Journal of Innovate Computing, Information and Control. – 2012. – 8(11). – P. 7761–7779. – URL: <http://www.ijicic.org/ijicic-11-07073.pdf>, (дата обращения: 31.03.2016).

22. Ayman A.A. PID Parameters optimization using genetic algorithm technique for electrohydraulic servo control system // Intelligent Control and Automation. – 2011. – 2. – P. 69–76. DOI: 10.4236/ica.2011.22008

23. Michalewicz Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. – SpringerVerlag Berlin and Heidelberg. – 1996. – P. 387.

24. Eiben A.E., Smith J.E. Introduction to evolutionary computing. – Springer Verlag Berlin. – 2003.

25. Haupt R.L., Haupt S.E. Practical genetic algorithms / John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2004.

26. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. – MI: University of Michigan Press. – 1975.

References

1. Godovoi otchet o deiatel'nosti Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2017 [Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2017]. Moscow, 2018, available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (accessed 07 January 2022).

2. Bashirov M.G., Pavlova Z.Kh., Zakirnichnaia M.M., Khafizov A.M. Sovershenstvovanie sistem avtomaticheskogo upravleniia i protivovariinnoi zashchity trubchatykh pechei na osnove monitoringa parametrov protsessa koksoobrazovaniia [Improvement of the automatic control system and emergency protection of tubular seals based on monitoring the parameters of the coke formation process]. *Neftegazovoe delo*, 2018, no. 1, pp. 120-144.

3. Akhmetov C.A., Serikov T.P., Kuzeev I.R., Baiazitov M.I. Tekhnologiya i oborudovanie protsessov pererabotki nefiti i gaza [Technology and equipment of oil and gas refining processes: textbook]. Saint Petersburg: Nedra, 2006, 868 p.

4. Litiiaikin D.Iu., Murav'eva E.A. Razrabotka sistemy upravleniia bloka separatsii vodorodosoderzhashchego gaza [Development of a control system for the hydrogen-containing gas separation unit]. *Sovremennaiia nauka: aktual'nye problemy, dostizheniia i innovatsii. Cbornik statei II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Belebei, 2021, pp. 46-48.

5. Matveev D.S., Chikurov A.V., Khusniyarov M.Kh., Verevkin A.P., Bakhtizin R.N. Sistema operativnogo diagnostirovaniia avtomatizirovannogo tekhnologicheskogo kompleksa trubchatoi pechi na osnove produktsionnykh pravil [The system of operational diagnostics of the automated technological complex of the tubular furnace on the basis of production rules]. *Neftegazovoe delo: elektronnyi nauchnyi zhurnal UGNTU*, 2011, no. 4, pp. 4-13.

6. Abdrafikova F.F., Murav'eva E.A., Sharipov M.I. Ispol'zovanie modeli mashinnogo obucheniia dlia resheniia zadach real'nogo vremeni [Using a machine learning model to solve real-time problems]. *Sovremennye tekhnologii: dostizheniia i innovatsii-2021. Sbornik materialov III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; Sterlitamak*, 16 November 2021, pp. 327-329.

7. Tenev V.A. Reshenie zadachi mnogokriterial'noi optimizatsii geneti-cheskimi algoritmami [Solving the problem of multi-criteria optimization by genetic algorithms]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. Izhevsk: Izhevskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006, no. 2/8, pp. 103-109.

8. Svodnaia statistika pozharov v Rossiiskoi Federatsii [Summary statistics of fires in the Russian Federation], available at: <http://wiki-fire.org/Сводная%20статистика%20пожаров%20в%20Российской%20Федерации.ashx> (accessed 07 January 2022).

9. Statistika pozharov v Rossii [Statistics of fires in Russia], available at: <http://www.pojarnayabezopasnost.ru/statistika.html> (accessed 07 January 2022).

10. Ezhegodnye otchety o deiatel'nosti Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Annual reports on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision], available at: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (accessed 07 January 2022).

11. Verevkin A.P., Sletnev M.S. Uovershenstvovannoe upravlenie (APC) neftekhimicheskim proizvodstvom na osnove mnogourovnevoi neirosetevoi sistemy podderzhki priniatiia reshenii [Advanced Management (APC) of petrochemical production based on a multi-level neural network decision support system]. *Neftegazovoe delo*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 61-64.

12. Pozharnaia opasnost' trubchatykh pechei [Fire hazard of tubular furnaces], available at: <http://mirznanii.com/a/195242-3/pozharnaya-opasnost-trubchatykh-pechey> (accessed 07 January 2022).

13. Kuznetsov D.L., Khafizov A.M., Malysheva O.S. Ekonomicheskoe obosnovanie razrabotki programmy diagnostirovaniia zmeevikov trubchatykh pechei [Economic justification for the development of a program for diagnosing coils of tubular furnaces]. *Integratsiia nauki i obrazovaniia v vuzakh neftegazovogo profilia*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi neftianoi tekhnicheskii universitet, 2016, pp. 342-344.

14. Khafizov A.M., Bashirov M.G. Informatsionno-upravliaiushchaia sistema obespecheniia bezopasnosti trubchatykh pechei s ispol'zovaniem geneticheskikh algoritmov [Information and control system for ensuring the safety of tubular furnaces using genetic algorithms]. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi neftianoi tekhnicheskii universitet, 2019, 93 p.

15. Lankhorst M.M. A genetic algorithm for the induction of nondeterministic pushdown automata. computing science report. University of Groningen Department of Computing Science, 1995.

16. Mishchenko V.A. Korobkin A.A. Ispol'zovanie geneticheskikh algoritmov v obuchenii neuronnykh setei [The use of genetic algorithms in the training of neural networks]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2011, no. 6.

17. Das S., Mozer M.C. A unified gradient-descent/clustering architecture for finite state machine induction. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1994.

18. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization. *Telkomnika*, 2013, 11(3), pp. 1524-1530, available at: <http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf> (accessed 31 March 2016).

19. Goldberg D.E. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

20. Goldberg D.E. Simple genetic algorithms and the minimal deceptive problem. *Genetic Algorithms and Simulated Annealing. Chapter 6*. Los Altos, CA, Morgan Kauffman, 1987, pp. 74-88.

21. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm. *International Journal of Innovate Computing, Information and Control*, 2012, 8(11), pp. 7761-7779, available at: <http://www.ijicic.org/ijicic-11-07073.pdf>, (accessed 31 March 2016).

22. Ayman A.A. PID Parameters Optimization Using Genetic Algorithm Technique for Electrohydraulic Servo Control System. *Intelligent Control and Automation*, 2011, 2, pp. 69-76. DOI: 10.4236/ica.2011.22008

23. Michalewicz Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. SpringerVerlag Berlin and Heidelberg, 1996, 387 p.

24. Eiben A.E., Smith J.E. Introduction to evolutionary computing. Springer Verlag Berlin. – 2003.

25. Haupt R.L., Haupt S.E. Practical genetic algorithms. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.

26. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. – MI: University of Michigan Press, 1975.

Сведения об авторах

Пименов Андрей Алексеевич (Стерлитамак, Россия) – студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета, Института химических технологий и инжиниринга (453118, Стерлитамак, Проспект октября, 2, e-mail: samcave@mail.ru).

Муравьева Елена Александровна (Стерлитамак, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета, Института химических технологий и инжиниринга (453118, Стерлитамак, Проспект октября, 2, e-mail: muraveva_ea@mail.ru).

Каримов Илѣсжон Файзуллоевич (Стерлитамак, Россия) – студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета, Института химических технологий и инжиниринга (453118, Стерлитамак, Проспект октября, 2, e-mail: ilyos.karimov08@gmail.ru).

About the authors

Andrey A. Pimenov (Sterlitamak, Russian Federation) – Student of the Department of "Automated technological and information systems" branch of the Ufa State Petroleum Technological University, Institute of Chemical Technology and Engineering (453118, Sterlitamak, 2, October ave., e-mail: samcave@mail.ru).

Elena A. Muravyova (Tomsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of "Automated technological and information systems" branch of the Ufa State Petroleum Technological University, Institute of Chemical Technology and Engineering (453118, Sterlitamak, 2, October ave., e-mail: muraveva_ea@mail.ru).

Ilyosjon F. Karimov (Sterlitamak, Russian Federation) – Student of the Department of "Automated technological and information systems" branch of the Ufa State Petroleum Technological University, Institute of Chemical Technology and Engineering (453118, Sterlitamak, 2, October ave., e-mail: ilyos.karimov08@gmail.ru).

Поступила: 04.04.2022. Одобрена: 01.08.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Пименов, А.А. Контроль закоксованности змеевика трубчатых нагревательных печей в производстве водорода паровой конверсией на основе генетических алгоритмов / А.А. Пименов, Е.А. Муравьева, И.Ф. Каримов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 49–68. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.03

Please cite this article in English as:

Pimenov A.A., Muravyova E.A., Karimov I.F. Coil control of tubular heating furnaces in hydrogen production by steam conversion based on genetic algorithms. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 49-68. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.03