

УДК 62.501

Е. Д. Агафонов, Н. Р. Антропов (Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнева)
E-mail: agafonov@gmx.de

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

Статья посвящена вопросам построения адаптивных моделей и алгоритмов позволяющих корректировать показания датчиков давления на линейных участках трубопроводной сети. Используются гибридные модели, содержащие параметрическую и непараметрическую компоненты. С применением предложенных алгоритмов решена задача прогноза показаний датчиков давления технологического участка магистрального нефтепровода.

Ключевые слова: адаптивный алгоритм, гибридная модель, коррекция погрешностей, датчик давления.

E. D. Agafonov, N. R. Antropov (Siberian state aerospace university)

MEASUREMENT ERROR CORRECTION ALGORITHM OF PRESSURE SENSORS ON THE LINEAR PART OF THE MAIN PIPELINE

The article is dedicated to questions of construction an adaptive models and algorithms that allow to adjust the measurements of pressure sensors on the linear sections of the pipeline network. A hybrid model which contains parametric and nonparametric components is used. The problem of forecast measurements of pressure sensors on the linear sections of the main pipeline is solved by using the proposed approach.

Keywords: adaptive algorithm, a hybrid model, error correction, the pressure sensor.

Основной характеристикой любого измерительного прибора (датчика) является погрешность измерения контролируемого параметра. Погрешность измерения отображает величину расхождения между результатом измерения и реальным значением измеряемого параметра, и указывается в техническом паспорте прибора. Однако, на практике, величина погрешности часто не соответствует заявленным данным, а иногда и вовсе неизвестна. При этом в процессе эксплуатации прибора величина погрешности постоянно меняется. Причинами изменения погрешности могут стать изменение условий эксплуатации (внешние факторы), дрейф физических параметров самого датчика (внутренние факторы), возмущения в каналах связи датчика с регистрирующей аппаратурой, частичный или полный выход из строя датчика и так далее. В связи с этим, разработка соответствующих алгоритмов коррекции погрешностей является актуальной задачей, причем очевидна необходимость построения адаптивных подходов, функционирующих в условиях неопределенности и изменчивости окружающей среды.

В научной и справочной литературе [1-3] предлагаются различные подходы к коррекции погрешностей данных измерений датчиков. Один из подходов состоит в конструктивном изменении и оптимизации устройства датчика (оптимизация свойств чувствительного элемента, топологии, конструкции корпуса). Другой подход заключается во включении в структуру прибора дополнительных пассивных и активных элементов, обеспечивающих необходимую коррекцию. Третий подход предусматривает разработку алгоритмических методов коррекции по математической модели (концепция интеллектуального датчика). Именно этот подход используется авторами работы.

Объектом исследования в настоящей работе является магистральный нефтепровод. Современные трубопроводные сети и гидравлические системы оснащены различной измерительной аппаратурой и информационно-измерительными системами, используемыми для мониторинга технологических параметров. Давления в различных конструктивных элементах трубопровода, в том числе в его линейной части, в обязательном порядке подвергаются измерению и анализу.

Датчик давления представляет собой контрольно-измерительное устройство, состоящее из чувствительных элементов, воспринимающих давление, и преобразователей, собранных в корпусе. Давление, прикладываемое к чувствительному элементу, приводит к изменению внутренних характеристик датчика, которые в итоге преобразуются в электрический сигнал. В общем случае зависимость электрического сигнала от давления не является линейной и зависит от температуры среды, в которой находится датчик. Для устранения этой нелинейности в датчиках устанавливаются специальные электронные преобразователи [1].

Наиболее общая схема датчика давления представлена на рис. 1.

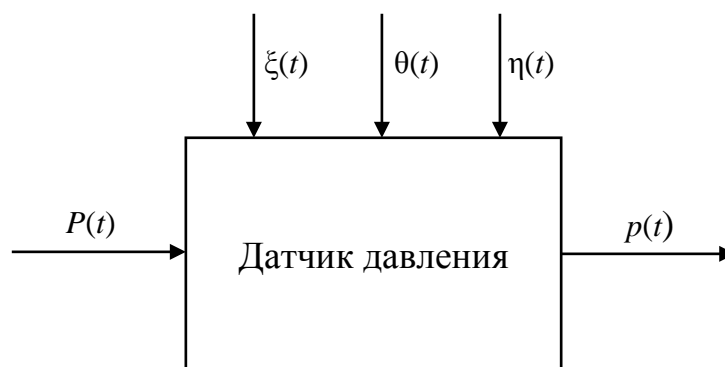


Рис. 1. Наблюдения входных и выходных переменных датчика

Здесь величины $P(t)$, $p(t)$ представляют собой соответственно входную (давление) и выходную (электрический сигнал) переменные датчика; $\xi(t)$, $\theta(t)$, $\eta(t)$ – случайная аддитивная, мультипликативная помехи и систематическая погрешность. $\xi(t)$, $\theta(t)$ имеют нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию, $\eta(t)$ – ограниченное математическое ожидание и

дисперсию. При этом связь соответствующих переменных описывается следующим выражением:

$$p(t) = A(P(t)) \cdot \theta(t) + \xi(t) + \eta(t), \quad (1)$$

где A – неизвестный оператор, связывающий входную и выходную величины.

1. Постановка задачи коррекции показаний датчиков давления

Вдоль профиля линейной части магистрального нефтепровода на определенном расстоянии друг от друга (обычно не более 30 км) располагаются датчики давления. По причинам, связанным с различием в типах, производителях датчиков, их техническим состоянием, особенностями считывания данных измерений, измеренные величины имеют отличающиеся друг от друга систематические и случайные погрешности. Необходимо, пользуясь сведениями о физических закономерностях распределения давления вдоль профиля трубопровода, о взаимном расположении датчиков, на основании выборки измерений скорректировать показания датчиков. В частном случае предлагается автоматизировать выявление неработающих датчиков с оценкой измеряемой величины (давления) в местах их установки.

2. Априорная и текущая информация об объекте исследования

В соответствии с уравнением Бернулли [4], давление на участке трубопровода с постоянным диаметром без самотечных участков при установившихся режимах работы изменяется линейно (рис. 2).

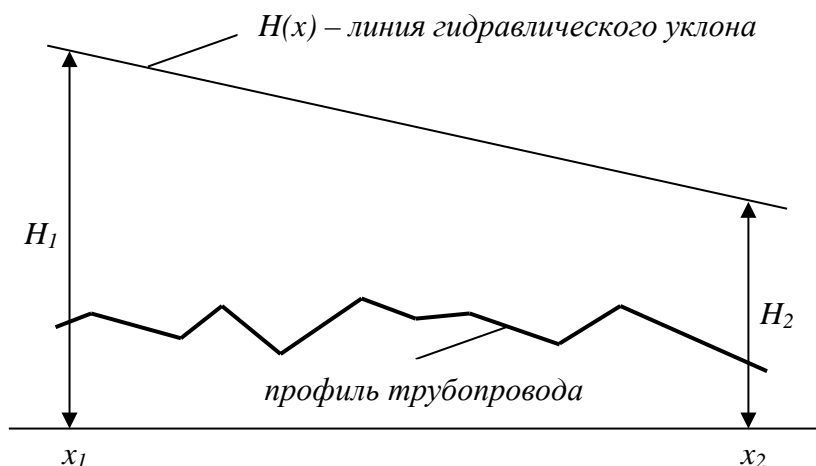


Рис. 2. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

На рисунке приняты следующие обозначения: $H_1 = p_1/\rho g + z_1$, $H_2 = p_2/\rho g + z_2$ – напоры в начальной (x_1) и конечной точке (x_2) рассматриваемого участка профиля нефтепровода. z_1 , z_2 – геометрические профили нефтепровода в точках x_1 и x_2 соответственно.

Прямая, соединяющая концы отрезков H_1 и H_2 , называется линией гидравлического уклона. Линия гидравлического уклона отображает

распределение напоров (давлений) по длине нефтепровода. Физический смысл гидравлического уклона – потеря напора на трение, приходящаяся на единицу длины трубопровода [4].

Линейность зависимости давления от координаты сечения трубопровода наблюдается в идеальном случае, при постоянстве внутреннего сечения трубопровода, неизменности физических характеристик перекачиваемой нефти вдоль профиля трубопровода и т. д. В реальности распределение давлений отличается от линейного. Наличие местных сопротивлений, естественный дрейф физических характеристик нефти способствуют сдвигам, изломам, а также изменению наклона линии гидравлического уклона. Однако, близость гидроуклона к линейному виду может быть использована как *априорная информация* при построении модели распределения давлений. Кроме этого необходимо учитывать *текущую информацию*, представленную в выборках измерений давлений вдоль профиля нефтепровода. Прогноз показаний датчиков сводится к решению *задачи идентификации* [5].

Применяемые в настоящее время алгоритмы идентификации зачастую ограничены использованием в них исключительно параметрических подходов. Данные обрабатываются с применением моделей с известной параметрической структурой и последующей оценкой параметров. Качество идентификации с использованием таких процедур в большой степени зависит от правильности выбора параметрической структуры модели. Модели, построенные в рамках непараметрического подхода [6], не используют в полной мере имеющуюся априорную информацию. В связи с этим для решения поставленной задачи предлагается использовать гибридные модели [7], как средство наиболее полного учета как информации о структуре модели, процессе измерения и характеристиках измеряемых величин, так и закономерностей, содержащихся непосредственно в выборках измеренных величин давления.

3. Гибридные модели

Пусть имеется выборка наблюдений состояния объекта $D_s: V=\{p(x_i), x_i, i=\overline{1,k}\}$ и известны сведения $D_p: \hat{A}(x, \alpha)$ о виде преобразования $A(x)$ с точностью до набора параметров α (линейная модель).

Примем $q_{\Sigma}(x) = A(x) - \hat{A}(x)$ либо $q_{\Sigma}(x) = A(x)/\hat{A}(x)$, тогда гибридная модель запишется в виде:

$$p_{\Sigma}(x) = \hat{A}(x, \alpha) + \hat{q}(x) \quad (2)$$

для аддитивной схемы учета ошибки или

$$p_{\Pi}(x) = \hat{A}(x, \alpha) \cdot \hat{q}(x) \quad (3)$$

в случае мультипликативной ошибки измерений.

Преобразование $\hat{q}(x)$ восстанавливается с помощью непараметрической оценки регрессии [7]:

$$\hat{q}(x) = \frac{\sum_{i=1}^k q[x_i] \Phi\left(\frac{x-x_i}{c_n}\right)}{\sum_{i=1}^k \Phi\left(\frac{x-x_i}{c_n}\right)}, \quad (4)$$

где значения $q[x_i]$ вычисляются на основании выборки D_s :

$$q_{\Sigma}[x_i] = p(x_i) - \hat{A}(x_i, \alpha), i = \overline{1, k}. \quad (5)$$

$$q_{\Pi}[x_i] = \frac{p(x_i)}{\hat{A}(x_i, \alpha)}, i = \overline{1, k}. \quad (6)$$

Ядерные функции $\Phi(\cdot)$ и параметр размытости c_n удовлетворяют условиям сходимости [6].

Разнообразие методов расчета функции невязки порождает проблему неопределенности в обосновании выбора той или иной разновидности гибридных моделей. Для невязки типа сумма установлена высокая эффективность при наличии аддитивных помех, для невязки типа произведение – при наличии мультипликативных помех [8]. При отсутствии априорных сведений о характере случайных воздействий целесообразно применение коллективных методов оценивания [8-11]. Одним из возможных вариантов построения такого коллектива может быть модель вида [7]:

$$p(x) = \lambda \cdot p_{\Pi}(x) + (1 - \lambda) \cdot p_{\Sigma}(x), \lambda \in [0, 1], \quad (7)$$

где $p_{\Pi}(x)$ и $p_{\Sigma}(x)$ – гибридные модели с невязкой типа произведение и суммы соответственно, λ – вес модели $p_{\Pi}(x)$ в коллективе. Коллективы вида (7) позволяют наиболее полно учитывать исходную априорную информацию и нивелировать проблему неопределенности выбора функции невязки.

Следует отметить то, что рассмотренные выше модели обладают свойствами асимптотической несмещенности и сходимости в среднеквадратическом [8].

4. Описание исходных данных и процедуры построения моделей

Исходные данные для построения модели представляют собой сведения о параметрическом описании процесса $\{D_p: p(x)=ax+b\}$, что соответствует идеальной линейной модели зависимости давления от координаты сечения трубопровода, а также выборку $\{D_s\}$ наблюдений показаний датчиков давления расположенных вдоль линии профиля нефтепровода. Протяженность участка составляет $L=907,8$ км. Число линейных участков $T=5$. Количество датчиков давления $k=87$, объем выборки $N=1440$ измерений, то есть имеется выборка $\{D_s: V=\{p_i(t), i=\overline{1, k}, t=\overline{1, N}\}\}$.

Проведем предварительную статистическую обработку данных (*цензурирование выборки*). Решению данной задачи посвящено множество работ, в частности, применительно к задаче идентификации [12]. Для этого рассчитаем среднее m_i и среднеквадратическое отклонение σ_i для каждого i -го датчика давления.

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N p_i(t), i = \overline{1, k}, \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (p_i(t) - m_i)^2}, i = \overline{1, k}.$$

Далее, исключим из выборки наблюдений показания датчиков, для которых среднеквадратическое отклонение превышает 3σ . Таким образом, мы исключим из выборки грубые погрешности измерений. Дальнейшим шагом будет исключение из выборки неработающих датчиков давления. Для этого зададим некоторое положительное число Δp , которое в некотором смысле определяется технологическим регламентом и отражает возможную величину разницы давлений соседних датчиков. Превышение измеренной величины давления заданного значения будет свидетельствовать о неисправности или выходе из строя датчика, либо об утечке на данном участке нефтепровода. Данное условие можно выразить соотношением:

$$|p_i - p_{i+1}| \leq \Delta p, i = \overline{1, k}.$$

При этом Δp не учитывается для датчиков предшествующих нефтеперекачивающей станции (НПС), так как на НПС происходит резкое нагнетание давления, что свойственно данным участкам нефтепровода.

После этого проведем процедуру усреднения выборки D_s по времени:

$$p(x_i) = m_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N p_i(t), i = \overline{1, k}.$$

Таким образом, исходная выборка D_s преобразуется в новую рабочую выборку $\{D_s: V = \{p(x_i), x_i, i = \overline{1, k}\}\}$.

В качестве моделей процесса распределения давления будем использовать модели (2), (3) и (7). Проведем сравнительный анализ моделей. Алгоритм построения моделей (2) и (3) предлагается в следующем виде:

1. Оценка параметров $\alpha = (a, b)$ линейной модели $p(x) = ax + b$ с помощью метода наименьших квадратов по данным D_s .
2. Расчет невязок $q[t]$ по формулам (5), (6).
3. Непараметрическое оценивание функции невязки $\hat{q}(x)$ в соответствии с выражением (4).
4. Суммируем (для модели (2)) или перемножаем (для модели (3)) полученные параметрическую и непараметрические модели.

Данную процедуру повторяем для каждого магистрально участка нефтепровода. Модель (7) формируется как комбинация моделей (2) и (3).

Настройка весовых параметров λ в моделях (7) и параметров размытости c_n в непараметрических оценках (4) производилась методом наилучшей пробы, то есть на заданном диапазоне значений параметра бросались точки с некоторым шагом, далее вычислялось значение среднеквадратического критерия для каждой точки, после чего выбиралось значение параметра, соответствующее наименьшей величине критерия.

В итоге гибридные модели (2), (3) и коллектив (7) примут вид:

$$p_{i,\Sigma}(x) = a_i x + b_i + \hat{q}_i(x), x \in \overline{I_i, I_{i+1} - 1},$$

$$p_{i,\Pi}(x) = (a_i x + b_i) \cdot \hat{q}_i(x), x \in \overline{I_i, I_{i+1} - 1},$$

$$p_{i,\Sigma,\Pi}(x) = \lambda \cdot p_{i,\Pi}(x) + (1 - \lambda) \cdot p_{i,\Sigma}(x), x \in \overline{I_i, I_{i+1} - 1},$$

где $p(x)$ – давление в точке x , $\alpha_i = (a_i, b_i)$, $i = \overline{1, T}$ – параметры линейной модели i -го магистрального участка нефтепровода, $\hat{q}_i(x)$, $i = \overline{1, T}$ – непараметрические оценки функции невязки. Точки I_i , $i = \overline{1, T}$ соответствуют датчикам давления, расположенным на НПС.

5. Результаты и их анализ

Результаты построения моделей, значения параметров и среднеквадратической ошибки соответствующей модели приведены в сводной таблице 1. В качестве сравнительных результатов также приведены расчеты для непараметрической и линейной модели.

Параметр Тип модели	a_i	b_i	cs_i	λ_i	W
Непараметрическая регрессия (I)	–	–	$cs_1=0.1831$ $cs_2=0.2445$ $cs_3=0.1467$ $cs_4=0.1972$ $cs_5=0.1811$	–	6.823e-04
Параметрическая линейная модель (II)	$a_1=-0.1741$ $a_2=-0.1819$ $a_3=-0.1821$ $a_4=-0.1721$ $a_5=-0.1864$	$b_1=45.40$ $b_2=68.33$ $b_3=99.71$ $b_4=135.06$ $b_5=176.06$	–	–	19.8128
Гибридная модель с аддитивной невязкой (III)	$a_1=-0.1741$ $a_2=-0.1819$ $a_3=-0.1821$ $a_4=-0.1721$ $a_5=-0.1864$	$b_1=45.40$ $b_2=68.33$ $b_3=99.71$ $b_4=135.06$ $b_5=176.06$	$cs_1=0.1218$ $cs_2=0.1253$ $cs_3=0.1070$ $cs_4=0.1225$ $cs_5=0.1817$	–	1.486e-04
Гибридная модель мультипликативной невязкой (IV)	$a_1=-0.1741$ $a_2=-0.1819$ $a_3=-0.1821$ $a_4=-0.1721$ $a_5=-0.1864$	$b_1=45.40$ $b_2=68.33$ $b_3=99.71$ $b_4=135.06$ $b_5=176.06$	$cs_1=0.1931$ $cs_2=0.1577$ $cs_3=0.1739$ $cs_4=0.1859$ $cs_5=0.1216$	–	7.859e-04
Коллектив гибридных моделей III и IV (V)	$a_1=-0.1741$ $a_2=-0.1819$ $a_3=-0.1821$ $a_4=-0.1721$ $a_5=-0.1864$	$b_1=45.40$ $b_2=68.33$ $b_3=99.71$ $b_4=135.06$ $b_5=176.06$	Для III модели	$\lambda_1=6.76e-05$ $\lambda_2=2.55e-06$ $\lambda_3=5.23e-05$ $\lambda_4=2.72e-06$ $\lambda_5=3.87e-06$	1.486e-04
			$cs_1=0.1218$ $cs_2=0.1253$ $cs_3=0.1070$ $cs_4=0.1225$ $cs_5=0.1817$		
			Для IV модели		
			$cs_1=0.1931$ $cs_2=0.1577$ $cs_3=0.1739$ $cs_4=0.1859$ $cs_5=0.1216$		

Таблица 1. Параметры соответствующих моделей и значения среднеквадратичной ошибки

В качестве критерия качества идентификации использовался среднеквадратический критерий

$$W = \frac{1}{N} \sqrt{(p_{test}(x_i) - p(x_i))^2},$$

где N – объём выборки, $p_{test}(x_i)$, $i=\overline{1, k}$ – элементы тестовой выборки, $p(x_i)$ – вычисленное на основании модели значение давления.

Параметры a_i , b_i , $i=\overline{1, T}$ коллектива гибридных моделей равны параметрам соответствующих моделей, входящих в коллектив.

По результатам оптимизации параметра λ в коллективах можно сделать вывод о том, что в данных отсутствуют грубые ошибки (выбросы) и степень зашумленности данных достаточно низкая, о чем свидетельствует значение параметра, близкое к нулю. Большая величина среднеквадратической ошибки для гибридной модели с мультипликативной невязкой (IV), чем для гибридной модели с аддитивной невязкой (III) это подтверждает, так как данный тип моделей (моделей IV) обладает более высокими показателями грубости (робастности) по отношению к случайным воздействиям на исследуемый объект. При относительно малых случайных воздействиях более эффективной является гибридная модель с аддитивной невязкой (III). Этому свидетельствует наименьшая величина среднеквадратичной ошибки для данной модели. На следующем рисунке (рис. 3.) представлен её график.

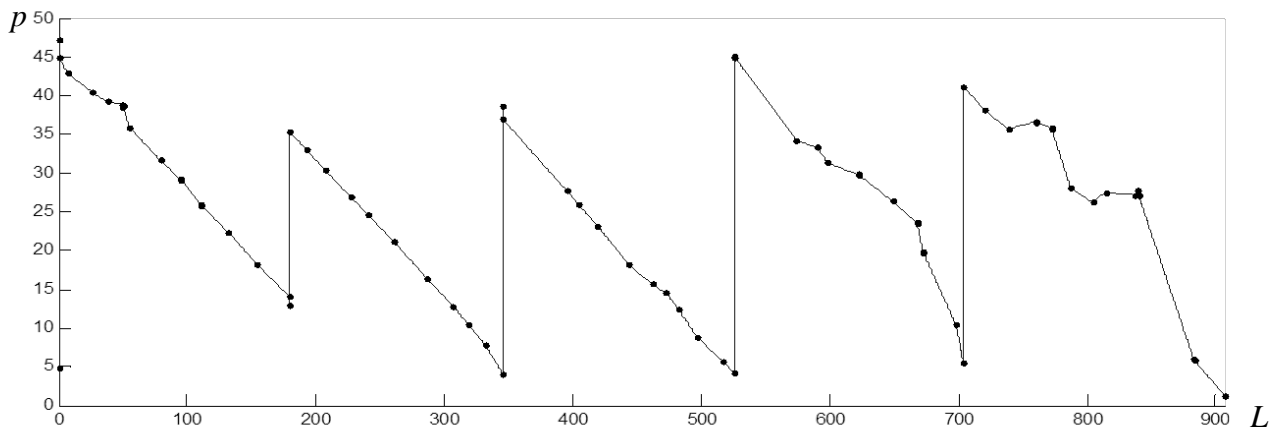


Рис. 3. Гибридная модель с аддитивной невязкой (III)

6. Заключение

В работе рассмотрен подход к решению задачи коррекции ошибок измерений датчиков давления линейной части магистрально нефтепровода. Построение модели магистрального нефтепровода ранее рассматривалось в [13]. С применением предложенного алгоритма решена практическая задача прогноза показаний датчиков давления. Исходя из априорной информации,

закрывающейся в линейности гидравлического уклона, а также на основании ретроспективной выборки показаний датчиков. Предложенная процедура позволяет:

1. Корректировать ошибки измерений датчиков давления на основании построенных моделей.
2. Прогнозировать показания заведомо неработающих датчиков, а также давление в промежутках между установленными датчиками.
3. Экстраполировать зависимость давлений от координаты профиля трубопровода в стационарных режимах.

В ходе исследования установлено, что процесс распределения давления линейной части магистрального нефтепровода наилучшим образом описывается гибридной моделью с аддитивной невязкой. Данный тип моделей позволяет использовать как априорную информацию (вид предполагаемой зависимости), так и текущую информацию (выборки измерений), что позволяет более полно учитывать имеющиеся сведения о закономерностях и характеристиках исследуемого процесса распределения давлений.

Библиографический список

1. **Земельман М.А.** Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств / М.: Изд-во стандартов, 1972. – 199 с.
2. **Бромберг Э.М.** Тестовые методы повышения точности измерений. М. : Энергия, 1978. 176 с.
3. **Гельман М.М.** Автоматическая коррекция систематических погрешностей в преобразователях «напряжение – код». М. : Энергия, 1974. 88 с.
4. **Лурье М. В.** Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М.: Нефть и Газ, 2003. – 335 с.
5. **Эйкхофф П.** Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 683с.
6. **Медведев А.В.** Непараметрические системы адаптации. Новосибирск: Наука, 1983. – 176 с.
7. **Лапко А. В., Лапко В. А.** Гибридные модели в задаче восстановления стохастических зависимостей // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: сборник трудов конференции. - Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. - С. 1095-1100.
8. **Лапко А. В. Ченцов С. В., Крохов С. И., Фельдман Л. А.** Обучающие системы обработки информации и принятия решений. – Новосибирск: Наука, 1996. – 296 с.
9. **Агафонов Е.Д.** Адаптивные комбинированные модели в задаче идентификации процессов в магистральном нефтепроводе. // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: сборник трудов конференции. - Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3029-3037.

10. **Агафонов Е.Д., Мангалова Е.С.** О проблеме генерации разнообразия ансамблей индивидуальных моделей в задачах идентификации. // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: сборник трудов конференции. - Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3214-3223.

11. **Агафонов Е.Д., Мангалова Е.С.** Об одном алгоритме классификации с использованием коллективов непараметрических моделей // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2012. Вып. 42(2). С. 4-7.

12. **Кирик Е. С.** Об итерационном методе цензурирования данных в задаче оценивания регрессии // Автоматика и телемеханика, №4, 2007. С. 79-91.

13. **Агафонов Е.Д., Антропов Н.Р.** Об оценке решения системы уравнений в задаче построения модели гидравлической сети / Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 110-117.