

УДК 620.9; 551.501.816; 621.373

ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХАВОКРУГ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Р.Р. АГИШЕВ, К.Х. ГИЛЬФАНОВ

Казанский государственный энергетический университет

Рассмотрены возможности лазерного дистанционного зондирования на основе лидаров как эффективного метода экологического мониторинга воздушного бассейна предприятий теплоэнергетики. Изложены принципы построения систем лидарного мониторинга, рассмотрены особенности описания и обработки эхосигналов лазерного зондирования воздуха промышленных районов. Обсуждаются широкие перспективы использования бесконтактного лидарного метода для решения задач экологического мониторинга предприятий теплоэнергетики.

Ключевые слова: теплоэнергетика; экология; лазерное зондирование; лидар.

Стремление человечества глубже проникнуть в тайны природы и научиться использовать их в своих интересах имеет многовековую историю. Однако интенсификация промышленного производства, производство электрической и тепловой энергии, развитие транспорта, накопление отходов и другие факторы ведут к загрязнению окружающей среды и иным отрицательным последствиям человеческой активности. Среди многообразных воздействий человека на природу особое место занимают загрязнения воздушного бассейна, поскольку грязный воздух непосредственно влияет на здоровье людей, а атмосфера является основным фильтром солнечного излучения, поступающего на поверхность земли.

Промышленное производство электрической и тепловой энергии сопровождается крупномасштабным энергетическим и материальным обменом с окружающей средой, и поэтому оно требует адекватного управления [1, 2]. При этом зачастую имеет место заметное загрязнение окружающей природы. При сжигании твердого и жидкого топлива основные проблемы вызваны загрязнением окружающего воздуха оксидами серы и азота, золой, а также парниковым эффектом, обусловленным выбросами углекислого газа. При сжигании природного газа – это загрязнение оксидами азота и оксидом углерода.

Планомерная реализация политики экологической безопасности энергетики подразумевает, в том числе, создание экологически чистых энерго- и ресурсосберегающих малоотходных технологий, обеспечивающих рациональное производство и использование топливно-энергетических ресурсов, снижение выбросов

© Р.Р. Агишев, К.Х. Гильфанов Проблемы энергетики, 2016, № 3-4 загрязняющих веществ в окружающую среду, сокращение образования отходов производства и т.д. Поэтому проведение эффективного экологического мониторинга вокруг тепловых станций остается одной из важнейших задач, решаемых для уменьшения вредного воздействия на окружающую среду.

1. Принципы экологического мониторинга методами лазерного зондирования

При контроле экологического состояния воздушного бассейна особое место занимают бесконтактные методы [1, 3-6], обеспечивающие возможность получения данных с высокой оперативностью и в значительных пространственных масштабах, позволяющие предоставить количественную информацию о загрязнениях воздуха и их природе, а также выявить динамику распространения загрязняющих компонентов. Таким требованиям удовлетворяют лидарные (ЛИДАР: от англ. LightIdentification, Detection And Ranging – идентификация, детектирование и ранжирование света) методы дистанционного зондирования, которые используют рассеяние и поглощение лазерного излучения атмосферными компонентами. Их высокое временное и пространственное разрешение, недоступное для других способов, обусловлено использованием лазеров с малой расходимостью излучения. малой длительностью и высокой частотой Эхо-сигналы лазерного дистанционного повторения зонлирующих импульсов. мониторинга способны со скоростью света доставить в приемное устройство лидара информацию о распределении параметров исследуемой среды на пути распространения зондирующего излучения. При этом оперативность извлечения конечной информации определяется лишь быстродействием средств обработки принятых эхо-сигналов.

За последние десятилетия появилось много практически реализованных лазерных мониторинга. Построены многочисленные систем дистанционного лидары, группами во всем мире, публикации эксплуатируемые научными которых представляют как широкое многообразие параметров передающих и приемных подсистем лидаров, так и достигнутые пределы детектирования, дальности действия и т.п.

На рис. 1 показана иллюстрация принципа и масштаб экологического мониторинга, основанного на лазерном дистанционном зондировании. Принцип лидарного мониторинга дымовых выбросов отдельного предприятия иллюстрируется на рис. 2.



Рис. 1. Принцип экологического мониторинга промышленной зоны методом лазерного зондирования



Рис. 2. Иллюстрация лазерного зондирования отдельного объекта теплоэнергетики: Зондирующий луч лазера показан красным цветом, поле зрения приемной системы лидара – зеленым

Основные схемы лазерного зондирования показаны на рис. 3.





Чтобы дать представление о том, как принято описывать сигналы лазерного зондирования, рассмотрим случай моностатического зондирования, когда лазерный излучатель и приемная система расположены в непосредственной близости. На рис. 4 показана укрупненная модель лидара [1], в которой представлены зондируемая среда, лазерный излучатель и оптический приемник, блоки первичной и вторичной обработки.



Рис. 4. Укрупненная модель лидарной системы лазерного дистанционного зондирования

Пространственное изменение оптических параметров атмосферного воздуха на трассе зондирования связано с мощностью обратно рассеянного излучения известным соотношением, называемым уравнением оптической локации, или лидарным уравнением [1,3,4], которое в приближении однократного рассеяния имеет вид:

$$P_{\rm r}(\lambda,R) = \frac{1}{2} G(R) P_0 c \tau_{\rm p} \beta_{\rm \pi}(\lambda,R) A_{\rm r} T^2(\lambda,R) \xi_0(\lambda) / R^2, \qquad (1)$$

где P_0 – мощность лазерного импульса излучателя; τ_p – длительность импульса; c – скорость света; λ – длина волны; R – текущая дальность; A_r – площадь приемного объектива; $\beta_{\pi} = \sigma \cdot b$ – объемный коэффициент обратного рассеяния; σ – объемный коэффициент рассеяния; $b = \beta_{\pi}/\sigma$ – лидарное отношение, или модуль вектора индикатрисы рассеяния для угла π ; α – объемный показатель ослабления; $\xi_0(\lambda)$ – пропускание приемной оптической системы; G(R) – геометрический фактор лидара, характеризуемый интегралом перекрытия зондирующего луча и поля зрения приемника (G(R) = 1 при полном перекрытии).

© Проблемы энергетики, 2016, № 3-4

Коэффициент пропускания, или прозрачность атмосферы на длине волны λ:

 $T(\lambda, R) = \exp[-_0]^R \alpha(\lambda, r) \, dr]. \tag{2}$

Хотя в выражении (1) для рассеянного сигнала фигурирует мощность P_0 , очевидно, что интенсивность сигнала, рассеянного или отраженного от протяженного объекта, определяется произведением $P_0 \cdot \tau_p$, т.е. энергией импульса. При этом длительность импульса τ_p должна быть достаточно короткой, чтобы обеспечить требуемую разрешающую способность по расстоянию $\Delta R = c \cdot \tau_p/2$.

Если поле зрения приемной системы лидара соответствует поперечному сечению зондирующего луча на объекте наблюдения или перекрывает это сечение, то оценка мощности принимаемого лидарного эхо-сигнала согласно формуле (1) для однородной непоглощающей атмосферы может быть представлена в таком виде:

$$P_{\rm r}(R,\lambda) = G(R) \times P_0 / A_{\rm JV4a} \times A_{\rm JV4a} \cdot c \cdot \tau_{\rm p} \times \beta_{\rm \pi}(R) \times (A_{\rm r}/R^2) \times \xi_0(\lambda) \times \exp(-2_0 \int^R \alpha(r) dr).$$
(3)

Перекрытие	Плотность	Зондируе-	Коэфф.	Телесный	Эффектив	Ослабление в
пучка	мощности	мый объем	обратного	угол	ность	атмосфере
излучения и	на объекте		рассеяния	приема	оптичес-	на двойном
поля зрения		Сечение обратног			кой	пути
приемника		рассеяния			системы	

Амплитуда принятого лидаром эхо-сигнала определяется способностью атмосферы рассеивать излучение в направлении назад на последовательных участках трассы, а также ослаблением в атмосфере на двойном пути от лазера до рассеивающего объема и обратно. Рассеяние назад («обратное рассеяние») в атмосфере, в свою очередь, зависит от используемой длины волны лазерного излучения, числа, размера, формы и коэффициента преломления частиц, капель или молекул, находящихся на пути зондирующего излучения. Объемный коэффициент обратного рассеяния (рассеяния назад) β_{π} определяется как доля падающей энергии, рассеянная слоем атмосферы единичной длины в единичном телесном угле в направлении назад.

Чем меньше расходимость лазерного передатчика θ_0 , тем меньше площадь пятна излучения в плоскости мишени и больше интенсивность излучения на мишени.

Эффективная площадь приемного объектива A_r определяет телесный угол A_r/R^2 (плоский угол D/R), под которым приемник виден с расстояния R (при условии, что телесный угол расходимости зондирующего пучка не превышает телесный угол приема). Фокусное расстояние телескопа и диаметр отверстия полевой диафрагмы определяют угол поля зрения приемной системы.

С увеличением концентрации рассеивателей в атмосферном воздухе интенсивность рассеяния в обратном направлении, как правило, возрастает, хотя, строго говоря, зависимость является более сложной [1, 6].

В общем случае уравнение (1) содержит три неизвестные оптические характеристики: $\sigma(R)$, $\alpha(R)$ и b(R), и не может быть решено без каких-либо допущений или априорной информации о связи указанных переменных. Так в видимом диапазоне оправдано допущение $\alpha = \sigma$. Кроме того, часто считается, что $\beta_{\pi} = \sigma \cdot b$, где лидарное отношение *b* принимается постоянной величиной, известной заранее для определенного класса сред.

Оценка (1) мощности лидарного сигнала для оптически тонких слоев и дымки обеспечивает достаточно высокую точность и наиболее часто употребляется при моделировании лидаров. Однако следует отметить, что при значительной замутненности атмосферы реальный лидарный эхо-сигнал представляется аддитивной смесью элементарных потоков, обусловленных 1-, 2-..., *n*-кратным рассеянием.

3. Особенности распространения оптического излучения в атмосферном воздухе

Условия распространения оптического излучения оказывают большое влияние на возможность использования лазеров в различных системах, поскольку при прохождении лазерного излучения через атмосферу происходит его поглощение, рассеивание и ряд других эффектов. Ослабление оптического излучения в атмосфере подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бэра:

$$P = P_0 e^{-\alpha L}$$

где P_0 и P – мощности зондирующего и прошедшего атмосферу сигналов соответственно; α – показатель ослабления; L – длина пути, проходимого излучением в атмосфере. Здесь коэффициент пропускания атмосферы $e^{-\alpha L}$ зависит от объемного показателя ослабления атмосферы α , характеризующего, во сколько раз уменьшается поток излучения на единичном пути в направлении распространения. Причем

$\alpha = \sigma_{sa} + \sigma_{sm} + \sigma_a$,

где каждое из слагаемых определяется, соответственно, аэрозольным рассеянием, молекулярным рассеянием и поглощением.

Рассеяние в атмосфере

Лучистый поток рассеивается молекулами воздуха и присутствующими в атмосфере частицами, характеризующими аэрозольное рассеяние, размеры которых соизмеримы с длиной волны или больше нее: кристаллами солей, пылинками, поднятыми ветром с поверхности земли, остатками продуктов сгорания, каплями воды и кристаллами льда. Эти частицы рассеивают излучение лазера во всех направлениях, причем интенсивность такого рассеяния зависит от размера частиц и их распределения по размерам, а коэффициент рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны [4, 6].

При Рэлеевском (молекулярном) рассеянии зондирующее излучение, упруго рассеянное атомами или молекулами, наблюдается на исходной частоте. В случае аэрозольного рассеяния (рассеяния на частицах, или рассеяния Ми) зондирующее излучение, упруго рассеянное малыми частицами (размер которых сравним с длиной волны излучения), наблюдается на исходной частоте. Имеют большое значение сечения взаимодействия, так что при наличии даже ограниченного количества атмосферных частиц мощность эхо-сигнала рассеяния может на несколько порядков превышать мощность лидарных сигналов рэлеевского или комбинационного рассеяния. Поэтому с помощью лазерного зондирования могут быть зарегистрированы весьма малые концентрации пыли и аэрозолей.

Невысокие сечения взаимодействия зондирующего лазерного излучения с исследуемой средой, присущие комбинационному (рамановскому) рассеянию, резонансному рассеянию, или флуоресценции, ограничивают возможности использования их для определения малых концентраций компонент.

При разработке лазерных приборов, предназначенных для работы в атмосфере, обычно выбирают лазер, генерирующий на длине волны излучения, которая соответствует одному из окон пропускания. Поэтому $\alpha_n <<\alpha_p$, и можно считать, что показатель ослабления излучения α определяется только рассеянием $\alpha \approx \alpha_p$. Здесь: α_n – объемный показатель поглощения; α_p – объемный показатель рассеяния.

Аэрозоли принято классифицировать по физико-химическим свойствам таким образом: пыли (частицы в твердой фазе), дымы (твердые конденсаты), туманы (жидкие конденсаты), дымки (мелкодисперсные частицы), смоги (смеси дымов, туманов и фотохимических продуктов).

Если коэффициенты пропускания атмосферы с учетом молекулярного рассеяния могут быть рассчитаны точно, то для расчета с учетом аэрозольного рассеяния

© Проблемы энергетики, 2016, № 3-4

необходимо знать количество, размеры, форму и состав вещества аэрозольных частиц, на которых происходит рассеяние излучения. Поэтому рассеяние в окнах пропускания атмосферы оценивают на основе экспериментальных результатов, согласно которым коэффициент пропускания атмосферы τ_p с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяния зависит от длины волны излучения и метеорологических параметров атмосферы, которые меняются во времени и в пространстве. Обычно показатель ослабления вычисляют на основе его корреляции с величиной метеорологической дальности видимости (МДВ) $S_{\rm мдв}$, которая легко определяется экспериментально и систематически фиксируется метеорологическими станциями. Показатель ослабления чистой атмосферы [3, 6], когда $S_{\rm мдв}$ >10 км,

$$\alpha(\lambda) = (\lambda / 0.55)^{-n} 3.91 / S_{\text{MZB}}, \qquad n = 0.585 \cdot S_{\text{MZB}}^{-1/3}.$$

Значения величин S_{мдв} для различных условий наблюдения приведены в таблице.

Таблица

Балл	Характеристика видимости	МДВ, км	Условия наблюдения		
0	Очень плохая	< 0,05	Очень сильный туман		
1		0,05-0,20	Сильный туман, очень густой снег		
2	Плонод	0,2-0,5	Умеренный туман или сильный снег		
3	плохая	0,5-1,0	Слабый туман, умеренный снег или сильная дымка		
4		1-2	Умеренный снег, очень сильный дождь, умеренная дымка		
5	Средняя	2-4	Слабый снег, сильный дождь или слабая дымка		
6		4-10	Умеренный дождь, очень слабый снег, слабая дымка		
7	Хорошая	10-20	Без осадков или слабый дождь		
8	Очень хорошая	20-50	Без осадков		
9	Исключительная	> 50	Совершенно чистый воздух		

Международная шкала видимости

При распространении пространственно-ограниченных световых пучков в атмосферных аэрозолях большое значение приобретает рассеянное назад излучение (так называемое обратное рассеяние). В первом приближении считают, что обратное рассеяние является изотропным, а его интенсивность пропорциональна степени замутненности атмосферы [4, 6]. В условиях дымки, характеризуемой величиной $S_{\text{мдв}}$ =3...7 км, яркость обратного рассеяния составляет около 10⁻³...10⁻¹⁰ начальной яркости прямого пучка.

Поглощение в атмосфере

При поглощении наблюдается ослабление зондирующего излучения, если частота излучения попадает в полосу поглощения исследуемой молекулы. Обычно сечение поглощения достаточно велико, поэтому на основе эффекта поглощения излучения исследуемым атмосферным газом реализовано множество методов и приборов для определения его средней концентрации. Например, применение метода дифференциального поглощения обычно предполагает использование широкополосного источника излучения и обработку сигналов на двух длинах волн: в центре линии поглощения исследуемой молекулы и в крыле этой линии. Основным недостатком метода является низкое пространственное разрешение или его отсутствие, которое проявляется в практической невозможности выделить вклад отдельных слоев атмосферы в результирующее ослабление вдоль всей зондируемой трассы.

Коэффициент поглощения σ_a существенным образом зависит от длины волны излучения и присутствующих в атмосфере газов. Эта особенность наиболее сильно проявляется в инфракрасной области спектра, в которой исследователям хорошо известны участки с заметным поглощением, обусловленные наличием различных газов. Присутствие тех или иных газов, некоторые из которых могут являться загрязняющими воздух компонентами, можно обнаружить путем измерения коэффициента пропускания атмосферы на длине волны, соответствующей линии поглощения интересующего газа.

Высокая степень монохроматичности излучения лазера создает особые условия его распространения в атмосфере. Для количественной оценки поглощения излучения лазера в атмосфере необходимо с высокой точностью знать спектры поглощения атмосферных газов. Молекулярные спектры поглощения атмосферных газов высокого разрешения представлены в широко распространенной базе данных *HITRAN* [5] и ряде других. Полосы поглощения некоторых газов в области длин волн лазерного зондирования показаны на рис. 5.

Как видно, лазерное зондирование позволяет продетектировать и измерить самые разные компоненты, загрязняющие окружающий воздух, которые образуются при сжигании предприятиями теплоэнергетики твердого, жидкого и газообразного топлива.

При использовании лидарного метода дифференциального поглощения и рассеяния [3, 4] дифференциальное ослабление двух зондирующих пучков определяется по их сигналам обратного рассеяния. Частота (длина волны) излучения в одном из пучков настраивается близко к частоте исследуемого молекулярного перехода, в то время как частота второго – несколько в стороне от частоты перехода. Принцип реализации метода представлен на рис. 6.



Рис. 5. Полосы поглощения некоторых газов при лазерном зондировании



Рис. 6. Иллюстрация лидарного метода дифференциального поглощения и рассеяния

При этом пространственное разрешение и сильные сигналы на выбранных длинах волн обуславливаются большим сечением рассеяния Ми, а на основе обработки отношения сигналов получают требуемую оценку дифференциального поглощения. Поэтому метод дифференциального поглощения и рассеяния обладает большой чувствительностью при зондировании молекулярных составляющих атмосферы с больших расстояний.

4. Архитектура обобщенной системы лазерного дистанционного зондирования

Архитектура лидарной системы дистанционного зондирования показана на рис. 7. Она состоит из следующих основных частей: оптического излучателя (передатчика) Изл; передающей оптической системы ПерО; приемной оптической системы ПрО и анализирующего элемента АЭ, осуществляющих пространственную фильтрацию принятого излучения; спектрального фильтра СФ; фотоприемника ФДет и блока первичной обработки информации ПОИ, осуществляющих электронную (частотновременную) фильтрацию сигнала; блока вторичной обработки информации ВОИ, осуществляющего математическую обработку принятых и предварительно преобразованных сигналов для восстановления искомых параметров атмосферы; блока управления и адаптации БУА; регистрирующего устройства Рег.



Рис. 7. Архитектура лидарной системы дистанционного зондирования:

БУА – блок управления и адаптации; ПерО – передающая оптика; Изл – излучатель; ПрО – приемная оптика; АЭ – анализирующий элемент; СФ – спектральный фильтр; ФДет – фотодетектор; ПОИ – блок первичной обработки информации; ВОИ – блок вторичной обработки информации; Рег – регистрирующее устройство

Основным предназначением лидарных систем является получение информации об оптических параметрах атмосферы путем ее лазерного зондирования и последующего приема и обработки рассеянного или отраженного атмосферой излучения. После прохождения через окружающую атмосферу эхо-сигнал воспринимается оптической системой лидара. Ее функции состоят в том, чтобы собрать по возможности больший поток приходящего излучения и с минимальными потерями направить его на фотодетектор, а также в оптической фильтрации приходящего эхосигнала для увеличения отношения интенсивности сигнала к шуму.

5. Лидарный мониторинг в экологических задачах теплоэнергетики

На рис. 8 показана структурная схема лидара [2], эффективно решающего задачи экологического мониторинга при обоснованной адаптации параметров системы лазерного зондирования к специфике воздушного бассейна предприятий теплоэнергетики.

Реализуемый подход позволяет путем прямой аппаратурной обработки лидарных эхо-сигналов восстанавливать дальностные профили загрязнений и строить карты распределения концентрации загрязнений. Пример представления обработанных результатов экологического мониторинга промышленного предприятия [6] в виде карты-схемы распределения загрязнений в воздухе на высоте около 50 м над его территорией показан на рис. 9. Карта-схема иллюстрирует результаты лидарных измерений распределения загрязняющего газа с концентрацией до 2·10⁻⁷ на расстоянии до 4 км. Значительный масштаб и высокая оперативность лазерного зондирования хорошо видны.



Рис. 8. Структура лидара, эффективно решающего задачи экологического мониторинга воздушного бассейна предприятий теплоэнергетики: *1* – блок управления и синхронизации; 2 – лазерный излучатель; *3* – приемная оптическая система с компенсатором *R*²; *4* – стробируемый фотоприемник; *5* – устройство выборки и хранения информации; *6* – блок дифференцирования; *7* – блок вычитания; *8*, *12* – блоки деления; *9*, *11* – интеграторы; *10* – экспоненциальный преобразователь; *13* – АЦП; *14* – опорный фотоприемник; *15* – счетчик дальности; *16* – регистратор



Рис. 9. Лидарное картографирование распределения концентрации загрязнений над территорией предприятия

Заключение

Рассмотрены возможности лазерных методов дистанционного экологического мониторинга для контроля атмосферного воздуха вокруг предприятий, производящих электрическую и тепловую энергию. Загрязняющие воздух компоненты, образующиеся при сжигании твердого и жидкого топлива и природного газа, могут быть оперативно продетектированы, их концентрации определены, а пространственное распределение отслежено лидарными методами зондирования.

При обоснованном выборе временной, спектральной и пространственной структуры зондирующих сигналов, способов обработки принятых эхо-сигналов, регистрации и отображения данных удается обеспечить эффективный экологический мониторинг воздушного бассейна предприятий теплоэнергетики с учетом набора системных параметров и параметров окружающей среды. При этом технологии лазерного зондирования [1, 3, 4 и др.] все более фокусируются на разработке измерительных систем с существенными сокращениями размеров, массы, потребляемой энергии и степени вовлеченности оператора. Варианты конструкций и практической реализации лидаров могут успешно адаптироваться к конкретным техническим условиям, финансовым ограничениям, а также к опыту и пристрастиям разработчиков и имеющейся элементной базе.

Summary

Facilities of laser remote sensing as an effective method of lidar-based environmental monitoring of the thermal power plants' air basin are considered. Principles © Проблемы энергетики, 2016, № 3-4 of lidar monitoring systems development are described. Features of description and processing of the laser sensing echo-signals obtained from the industrial areas' air are reviewed. Outlooks of using the contactless lidar-based method to solve the environmental problems are discussed.

Key words: thermal power plants; environmental monitoring; laser remote sensing; lidar.

Литература

1. Агишев Р.Р. Лидарный мониторинг атмосферы (монография). М.: изд. Физматлит, 2009. 316 с.

2. Бахмуров А.В., Гильфанов К.Х., Гольбрайх Л.Я. Совершенствование алгоритма управления объектом теплоэнергетики на основе интеллектуального контроллера // Энергетика Татарстана. 2013. № 1. С. 42-46.

3. R. Agishev, A. Comerón, A. Rodriguez et al. Dimensionless parameterization of LIDAR for laser remote sensing of the atmosphere and its application to systems with SiPM and PMT detectors / Applied Optics, 2014, vol. 53, N 15, pp. 3164-3175.

4. R. Agishev, A. Comerón, J. Bach et al. LIDARwithSiPM: Somecapabilitiesandlimitationsinrealenvironment / Optics&LaserTechnology, 2013, vol. 49, pp. 86-90.

5. Selected Papers on Laser Applications in Remote Sensing / Editors: W. Grant, E. Browell, R. Menzies // SPIE-Press, Bellingham, 1997.

6. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

7. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, D. Jacquemart et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, vol. 96, pp. 139-204.

Поступила в редакцию

19 февраля 2016 г.

Агишев Равиль Рустемович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)519-42-61. E-mail: ravil_agishev@mail.ru.

Гильфанов Камиль Хабибович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)519-42-62. Е-mail: gilfanov@kgeu.ru.