

## ВНУТРИТРУБНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

А.А. Александров<sup>1</sup>

С.П. Суцев<sup>1</sup>

В.А. Акатьев<sup>1,2</sup>

В.И. Ларионов<sup>1</sup>

Е.В. Метелкин<sup>2</sup>

rector@bmstu.ru

esrc@esrc.ru

akatiev07@mail.ru

lar@esrc.ru

sitech47@mail.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Российский государственный социальный университет, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрен метод внутритрубной оптической дефектоскопии дымовых труб с использованием сканирующего автономного аппарата, оборудованного видеокамерами. В целях повышения эффективности контроля состояния внутренней поверхности трубы предложено использовать безынерционные излучатели и гироскопическую платформу для размещения оптических приборов внутри автономного аппарата. Решена задача повышения разрешающей способности оптической дефектоскопии футеровки дымовой трубы с помощью автономного аппарата

### Ключевые слова

*Футеровка дымовой трубы, оптическая дефектоскопия, автономный аппарат, видеокамера, гироскопическая платформа, карданный подвес*

Поступила в редакцию 07.10.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

---

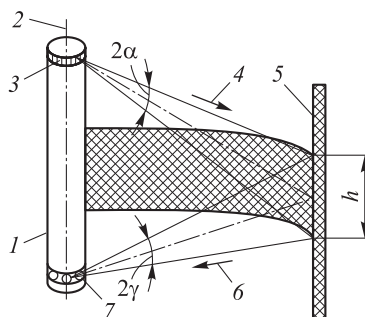
Промышленные дымовые трубы, являющиеся одной из основных частей технологических схем промышленных предприятий и тепловых электростанций, — это сложные инженерные сооружения, от надежности и долговечности которых зависит бесперебойная и безаварийная работа подключаемого к ним оборудования. Большинство функционирующих в настоящее время в РФ дымовых труб физически изношено и нуждается в ремонте и реконструкции. Прогнозирование технического состояния дымовых труб основано на использовании результатов различных методов неразрушающего контроля. Наиболее эффективным методом является внутритрубная оптическая дефектоскопия дымовых труб с использованием движущегося в трубе автономного аппарата (АА) [1–5].

Автономный аппарат представляет собой маятниковую систему (корпус аппарата с помощью траверсы подвешен на тросе). В условиях сильно закрученного высокотемпературного турбулентного потока восходящих дымовых газов АА выявляет и регистрирует дефекты футеровки действующей дымовой трубы с помощью расположенных на нем видеокамер, которые производят послойную съемку подконтрольных полос внутренней поверхности трубы (рис. 1).

Для обеспечения аэродинамической устойчивости АА на корпусе установлена система стабилизации в виде двух дисков, создающих воздушный пузырь

**Рис. 1.** Схема контроля футеровки:

1 — автономный аппарат; 2 — тросовая подвеска; 3 — излучатель; 4 — прямой поток света; 5 — футеровка; 6 — отраженный поток света; 7 — видеокамера;  $2\alpha$  — угол раскрытия светового потока;  $2\gamma$  — угол обзора видеокамерой кольцевого участка съемки в вертикальной плоскости;  $h$  — высота контролируемой полосы (1,5 м)



вокруг АА, благодаря которому наклон оси АА при колебаниях удерживается в пределах  $5^\circ$  [3, 4, 6–9]. Тем не менее при движении АА на спуск в восходящем закрученном потоке дымовых газов происходит периодическое изменение направлений съемки, что вызывает эффект смазанности изображений. Уменьшая выдержку диафрагмы при съемке и значительно увеличивая освещенность обследуемой зоны, можно добиться снижения этого эффекта. Однако увеличение освещенности в существующей конструктивной схеме АА требует значительного увеличения расхода энергии на подсветку, что зачастую не представляется возможным.

Установленные на АА кварцево-галогенные лампы требуют предварительного разогрева в течение двух-трех секунд и работают в импульсно-циклическом режиме с интервалом 10...11 с, т. е. при обследовании трубы лампы включаются в работу за все время контроля примерно 100 раз [3], что приводит к неоправданным затратам энергии на подсветку [10].

Применяя матричные светодиоды вместо ламп накаливания, можно исключить потери энергии на предварительный разогрев спиралей ламп. В циклическом режиме подсветки это позволит экономить энергию и направить ее на улучшение освещенности фотографируемых участков дымовой трубы и уменьшение выдержки видеокамер.

Как показывают расчеты, для подсветки внутренней полосы фотографирования дымовой трубы диаметром 14 м мощность кварцево-галогенных ламп должна составлять не менее 1200 Вт [3]. При движении АА в трубе система приемных видеокамер одновременно осуществляет послойную съемку полос поверхности трубы, причем каждая видеокамера производит одноразовое фотографирование с периодом, равным 10...11 с, который соответствует спуску АА на высоту контролируемой полосы с 10...15%-ным запасом на наложение. Кварцево-галогенный излучатель должен включаться не менее чем на 2 с раньше видеокамер, поскольку к моменту включения камер спираль излучателя должна быть разогрета до температуры накала. При контроле дымовой трубы высотой 120 м суммарная длительность работы излучателя системы подсветки составит примерно 180 с. Оценочный расход электроэнергии на подсветку составит около 250 кДж [4].

Время реакции на включение напряжения питания (стартовая инерция) для светодиода составляет десятки микросекунд, в то время как для галогенного излучателя — две-три секунды. В импульсно-периодическом режиме с периодом

10...11 с переход на светодиоды позволит сократить суммарный расход электрической энергии на подсветку более чем в 10 раз. Высвободившуюся энергию можно расходовать на повышение освещенности зоны подсветки, что позволит в несколько раз уменьшить выдержку диафрагмы при съемке и, соответственно, исключить эффект смазанности изображений контролируемых участков поверхности трубы.

Несмотря на то что встроенная система аэродинамической стабилизации позволяет ограничить амплитуду колебаний оси АА до  $5^\circ$ , кроме изменения направлений съемки и возникновения эффекта смазанности изображений также происходит периодический наклон оптической оси съемки, что приводит к отклонениям зон фотографирования, вследствие чего приходится заблаговременно планировать съемку смежных кольцевых полос поверхности трубы с частичным их наложением одну на другую. Принятое частичное наложение участков съемки предупреждает возможное выпадение участков поверхности трубы из обзора камер, но одновременно приводит к дополнительному расходу энергии на создание подсветки участков при их повторной съемке.

Наклон АА при его колебаниях вызывает смещение полосы контроля, т. е. кольцевая полоса контроля по отношению к намеченной зоне контроля с одной стороны трубы смещается вверх, частично захватывая уже отснятую в предыдущем цикле полосу контроля, с противоположной стороны трубы она смещается вниз, частично пропуская намеченную зону контроля. Появление пропущенных при съемке участков поверхности трубы можно предупредить за счет наложения соседних кольцевых полос контроля поверхности друг на друга. Но такое наложение приводит к дополнительным затратам энергии на повторную съемку пограничных участков смежных полос контроля.

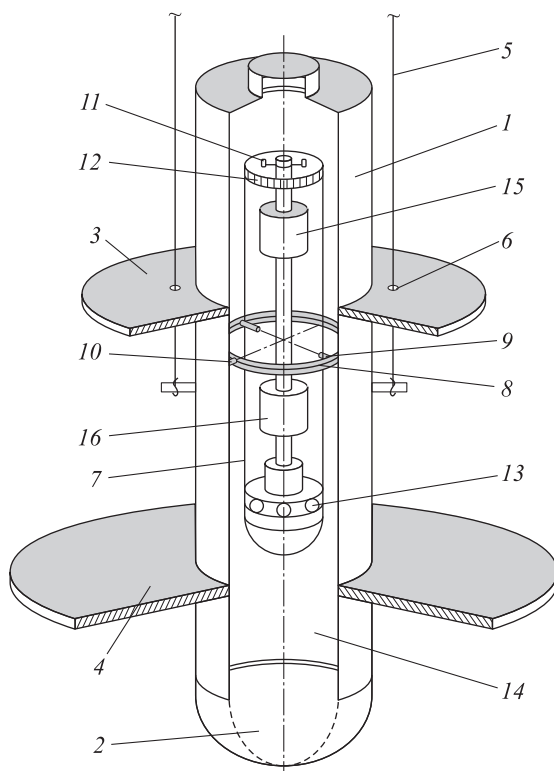
Смещение полосы контроля, вызываемое колебаниями АА, можно предупредить, если применить в АА для оптической стабилизации приборов контроля гироскопическую платформу в карданном подвесе (рис. 2) [5, 10].

Автономный аппарат имеет прозрачный цилиндрический кожух 1 с полусферическим обтекателем 2. На кожухе 1 установлены два диска 3 и 4 аэродинамической стабилизации и выступы для крепления строп 5. Стропы 5 свободно проходят через вертикальные отверстия 6 в верхнем диске 3.

Внутри кожуха на карданном подвесе размещена гиросtabilизированная платформа 7. Карданный подвес состоит из охватывающего платформу кольца 8 с двумя парами осей, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях: внутренних 9 и внешних 10 осей.

Карданный подвес обеспечивает поворот корпуса 1 аппарата при его колебаниях относительно платформы 7, что позволяет гиросtabilизировать вертикальную ось капсулы.

В верхней перегородке кожуха 1 установлены матричные светодиодные излучатели 11 и охлаждающие патроны 12 со льдом. В нижней части кожуха 7 по периферии размещены видеокамеры 13.



**Рис. 2.** Автономный аппарат с гиросtabilизированной платформой в карданном подвесе:

1 — цилиндрический кожух; 2 — полусферический обтекатель; 3, 4 — диски аэродинамической стабилизации; 5 — стропы; 6 — вертикальные отверстия; 7 — гиросtabilизированная платформа; 8 — кольца с двумя парами осей, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях; 9 — внутренние оси; 10 — внешние оси; 11 — излучатели; 12 — охлаждающие патроны со льдом; 13 — видеокамеры; 14 — приборный отсек; 15, 16 — роторы, вращающиеся в противоположных направлениях

В нижней части АА расположен приборный отсек 14, который предусмотрен для размещения аккумуляторов, бортового компьютера и другого массивного оборудования.

По оси цилиндрической капсулы расположены два ротора 15 и 16, вращающиеся в противоположных направлениях и обеспечивающие при кренах АА вертикальное положение капсулы в пространстве.

Ориентировочные массогабаритные показатели предлагаемой конструкции АА следующие: масса 130...160 кг, длина 1500...2000 мм, диаметр корпуса 450...600 мм, диаметр дисков 750...1000 мм, диаметр гиросtabilизированной платформы 300...400 мм.

Диаметр каждого ротора гироскопа 250 мм, число оборотов его вращения 3000 об/мин. Суммарный кинетический момент двух роторов  $3,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  [10].

Таким образом, для повышения эффективности внутритрубной диагностики функционирующих промышленных дымовых труб с использованием автономного аппарата, осуществляющего при спуске на тросовой подвеске внутри действующей

дымовой трубы послойный оптический контроль ее внутренней поверхности, необходима его модернизация. Модернизация заключается в следующем.

1. Стабилизация пространственного положения оптической оси АА путем размещения видеокамер внутри аппарата на гиростабилизированной платформе в кольцевом карданном подвесе, что обеспечит повышение разрешающей способности контроля (1 мм), а также снижение расхода энергии на подсветку.

2. Оснащение системы подсветки полос контроля экономичными безынерционными матричными светодиодами, позволит направить высвободившуюся энергию на повышение освещенности зоны съемки и, как следствие, уменьшить выдержку диафрагм оптических приемников и исключить эффект смазанности изображений контролируемых участков поверхности трубы с одновременным увеличением разрешающей способности при ее контроле.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Техническое диагностирование футеровок промышленных дымовых труб без остановки технологических процессов* / С.П. Суцев, В.И. Ларионов, В.А. Акатьев, А.А. Сулонов, Г.Л. Зуев, А.И. Черников // *Безопасность труда в промышленности*. 2003. № 6. С. 38–41.
2. *Акатьев В.А., Суцев С.П.* Об оценке эксплуатационной безопасности дымовых труб с помощью мобильного комплекса // *Вестник РУДН. Сер. Проблемы комплексной безопасности*. 2005. № 1. С. 77–91.
3. *Акатьев В.А., Суцев С.П.* Технология и параметры автономного аппарата для контроля футеровки функционирующей дымовой трубы // *Безопасность жизнедеятельности*. 2005. № 3. С. 32–44.
4. *Совершенствование способов и средств внутритрубного контроля функционирующей дымовой трубы* / В.А. Акатьев, В.И. Ларионов, Н.П. Милютин, С.П. Суцев, М.В. Дмитриев // *Безопасность жизнедеятельности*. 2012. № 1. С. 1–24.
5. *Акатьев В.А., Александров А.А., Волкова Л.В., Суцев С.П.* Патент РФ 2545062. Способ контроля внутренней поверхности дымовой трубы и устройство для его осуществления. Заявл. 26.08.2014. Оpubл. 27.03.2015, бюл. № 9.19.
6. *Калугин В.Т., Стрижак С.В.* Физическое и математическое моделирование отрывного обтекания аппарата-зонда с дисковыми стабилизаторами в закрученном потоке газа // *Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность*. 2008. № 125. С. 63–68.
7. *Калугин В.Т., Стрижак С.В., Суцев С.П.* Аэродинамическая стабилизация диагностического комплекса «Сканлайнер» // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2006. № 3. С. 87–94.
8. *Калугин В.Т., Стрижак С.В.* Выбор аэродинамической компоновки аппарата-зонда, обтекаемого турбулентным закрученным потоком газа // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн*. 2012. № 10. С. 181–198. DOI: 10.7463/1012.0461853 URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/461853.html>
9. *Калугин В.Т., Стрижак С.В.* Параметрические исследования аппарата-зонда в закрученном потоке газе // *Изв. ЮФУ. Технические науки*. 2012. Т. 131. № 6. С. 14–18.
10. *Akat'ev V.A., Metelkin E.V., Volkova L.V.* Intratubal optical defectoscopy of working chimneys // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015. Vol. 51. No. 9. P. 587–593.

**Александров Анатолий Александрович** — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, зав. кафедрой «Экология и промышленная безопасность» (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Суцев Сергей Петрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», генеральный директор Центра исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Акатьев Владимир Андреевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5), профессор кафедры «Техносферная безопасность и экология» Российского государственного социального университета (Российская Федерация, 129226, Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр.1).

**Ларионов Валерий Иванович** — д-р техн. наук, профессор, первый заместитель директора Центра исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Метелкин Евгений Владимирович** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность и экология» Российского государственного социального университета (Российская Федерация, 129226, Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр.1).

**Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Александров А.А., Суцев С.П., Акатьев В.А., Ларионов В.И., Метелкин Е.В. Внутритрубная дефектоскопия функционирующей промышленной дымовой трубы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 6. С. 128–135.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-128-135

## INTRATUBAL DEFECTOSCOPY OF WORKING INDUSTRIAL CHIMNEY

A.A. Aleksandrov<sup>1</sup>

rector@bmstu.ru

S.P. Sushchev<sup>1</sup>

esrc@esrc.ru

V.A. Akat'ev<sup>1,2</sup>

akatiev07@mail.ru

V.I. Larionov<sup>1</sup>

lar@esrc.ru

E.V. Metelkin<sup>2</sup>

sitech47@mail.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Russian State Social University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The study examines the method of intratubal optical defectoscopy of chimneys with use of the scanning autonomous device equipped with camcorders. For the purpose of control efficiency improvement of a pipe internal surface condition we offer to use inertialess radiators and gyro platform for disposition of optical devices in the autonomous device. Moreover, we provide the solution for resolution enhancement of optical defectoscopy of chimney lining with use of the autonomous device

### Keywords

*Chimney lining, optical flaw detection, autonomous device, camcorder, gyro platform, gimbal suspension*

## REFERENCES

- [1] Sushchev S.P., Larionov V.I., Akat'ev V.A., Suslonov A.A., Zuev G.L., Chernikov A.I. Technical diagnosis of industrial chimneys lining without technology process interruption. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], 2003, no. 6, pp. 38–41 (in Russ.).
- [2] Akat'ev V.A., Sushchev S.P. On assessment of chimneys operational safety using mobile package. *Vestnik RUDN. Ser. Problemy kompleksnoy bezopasnosti*, 2005, no. 1, pp. 77–91 (in Russ.).
- [3] Akat'ev V.A., Sushchev S.P. Autonomous device technology and parameters for lining control of operating chimneys. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2005, no. 3, pp. 32–44 (in Russ.).
- [4] Akat'ev V.A., Larionov V.I., Milyutin N.P., Sushchev S.P., Dmitriev M.V. Improving methods and equipment for chimney functioning in-tube control. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2012, no. 1, pp. 1–24 (in Russ.).
- [5] Akat'ev V.A., Aleksandrov A.A., Volkova L.V., Sushchev S.P. Sposob kontrolya vnutrenney poverkhnosti dymovoy truby i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Control method for chimney inner surface and device for its realization]. Patent RF no. 2545062 from 26.08.2014. (in Russ.).
- [6] Kalugin V.T., Strizhak S.V. Physical and mathematical modelling of separation flow around the aircraft-probe with disk-shaped stabilizers in gas twist stream. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of MSTU CA], 2008, no. 125, pp. 63–68 (in Russ.).
- [7] Kalugin V.T., Strijak S.V., Sushchev S.P. Aerodynamic stabilization of “Scanliner” diagnostic suite. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2006, no. 3, pp. 87–94 (in Russ.).
- [8] Kalugin V.T., Strijak S.V. Selection of aerodynamic configuration of a probe streamlined by a turbulent swirling gas flow. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 10, pp. 181–198 (in Russ.).  
DOI: 10.7463/1012.0461853 URL: <http://tachnomag.neicon.ru/en/doc/461853.html>
- [9] Kalugin V.T., Strizhak S.V. Parametric investigation of aerodynamic form of probe in swirling flow. *Izv. YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, vol. 131, no. 6, pp. 14–18 (in Russ.).
- [10] Akat'ev V.A., Metelkin E.V., Volkova L.V. Intratubal optical defectoscopy of working chimneys. *Russian journal of nondestructive testing*, 2015, vol. 51, no. 9, pp. 587–593 (in Russ.).  
DOI: 10.1134/S1061830915090028

**Aleksandrov A.A.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of Bauman Moscow State Technical University Head of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Sushev S.P.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Ecology and Industrial Safety Department, Director of Emergency Situations Research Center (ESRC) (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

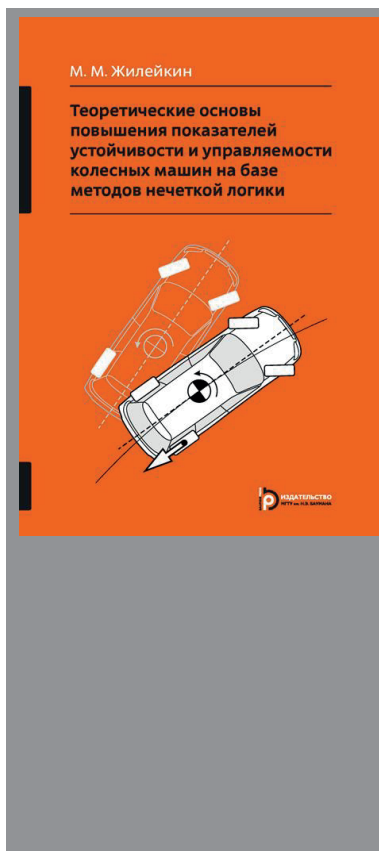
**Akat'ev V.A.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation), Professor of Technosphere Safety and Ecology Department, Russian State Social University (Vilgelma Pika ul. 4, str. 1, Moscow, 129226 Russian Federation).

**Larionov V.I.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director of Emergency Situations Research Center (ESRC), Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Metelkin E.V.** — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Technosphere Safety and Ecology Department, Russian State Social University (Vilgelma Pika ul. 4, str. 1, Moscow, 129226 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Aleksandrov A.A., Sushchev S.P., Akat'ev V.A., Larionov V.I., Metelkin E.V. Intratubal Defectoscopy of Working Industrial Chimney. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 6, pp. 128–135. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-128-135



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие автора

**М.М. Жилейкина**

**«Теоретические основы повышения  
показателей устойчивости и управляемости  
колесных машин на базе методов нечеткой  
логики»**

Управляемость и устойчивость автомобиля являются важнейшими эксплуатационными свойствами и составляющими активной безопасности движения, оценке которых придается большое значение. Представлены результаты теоретических исследований, выполненных на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Разработаны принципы повышения показателей устойчивости и управляемости как двухосных, так и многоосных колесных машин, оснащенных различными типами трансмиссий. Обоснованы принципиальные решения по способам управления движением машин, обеспечивающих повышение их курсовой и траекторной устойчивости. Предложены критерии оценки эффективности работы комплексной системы динамической стабилизации движения колесных машин. Разработаны алгоритмы работы системы динамической стабилизации с применением методов нечеткой логики для двухосных и многоосных колесных машин.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru