

**А.Г. Григорьянц, д.т.н., И.Н. Шиганов, д.т.н.,
Д.М. Мельников, к.т.н., М.А. Якимова, ассистент**
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1)
E-mail: mt12@bmstu.ru

Технологические основы определения степени изменения кинематической вязкости жидкой среды методом лазерного фазового анализа*

Оперативный контроль состояния смазочных материалов важен для поддержания эффективности работы машин и механизмов. Экспресс контроль при этом позволяет определять степень отработки масла непосредственно во время его эксплуатации. В данной работе предлагается методика определения зависимости вязкости смазочных материалов от температуры.

Ключевые слова: экспресс анализ; дизельное топливо; кристаллизация; вода; лазер.

**A.G. Grigoriyants, D.Eng., I.N. Shiganov, D.Eng.,
D.M. Melnikov, Can.Eng., M.A. Yakimova, Assistant**
(Bauman STU of Moscow, 5, Building 1,
2-d Baumanskaya Str., Moscow, Russia 105005)

Technological fundamentals for definition of changes in liquid medium kinematic viscosity by method of phase analysis

An active control of a lubricant state is significant for the support of operating efficiency in machinery. At the same time a rapid control allows defining the degree of lubricating oil use directly during its operation. This paper reports the procedure offered for the definition of the dependence of lubricating material viscosity upon temperature. This dependence obtaining in the course of material operation may characterize its application in specified temperature conditions which can deteriorate because of pollution, or wear. The method developed can be realized as a compact rapid device and used at the operation of lubricating materials for the control of a degree of their use from the point of view of viscosity temperature stability.

Keywords: rapid analysis; diesel oil; crystallization; water; laser.

Проведение эффективного контроля состояния смазочных материалов направлено на решение одной из наиболее актуальных задач эксплуатации машин и механизмов – поддержание эффективности работы приводных систем. Нарушение работы смазки неизбежно ведёт к снижению показателей приводов, что сказывается как на стоимости эксплуатации, так и на конкурентоспособности механизма в целом [1].

Необходимость контроля смазочных мате-

*Статья выполнена в рамках работ по гранту от Российского научного фонда № 141901216.

риалов связана с непрерывным процессом ухудшения их свойств в процессе эксплуатации. Причин возникновения такой ситуации может быть несколько, и они связаны как с естественными процессами, так и с недостаточным качеством материала [2].

Современные масла получают на основе базового – минерального или синтетического масла и дальнейшего обогащения его присадками, которые призваны обеспечить необходимый для материала комплекс свойств. В процессе работы присадки могут отработываться, что ведёт к деградации масла.

Другая причина ухудшения свойств – загрязнение примесями: водой [3], механическими частицами [4] и др. Попадание воды происходит при нарушении хранения материала или конструктивных ошибках в механизме. К главной причине попадания механических частиц можно отнести загрязнение продуктами износа движущихся частей [5]. Так же в масло может попадать нагар, что обусловлено моющим эффектом [6] или пыль, что особенно актуально, например, при эксплуатации гидроприводов строительной техники, где сильное загрязнение может стать даже причиной отказа системы и, соответственно, существенных затрат на ремонт [7].

Для предотвращения негативных эффектов связанных с ухудшением свойств смазочных материалов необходимо производить своевременную замену масел. Срок службы определяется по итогам многочисленных исследований, которые проходят как на стадии разработки масла, так и на стадии его производства, после чего завод-изготовитель может давать соответствующие рекомендации.

Производители техники так же проводят собственные исследования, чтобы лучше оценить непосредственное влияние условий эксплуатации. После окончания срока службы масла производится его замена (либо частичная замена), но важным вопросом остаётся установление точного момента, когда замена эффективна. Если менять масло слишком рано, растут общие затраты на смазочные материалы, а если слишком поздно – может происходить снижение эффективности работы механизма вплоть до его поломки [7].

Решением этой проблемы является контроль масел в процессе эксплуатации, который может проводиться двумя путями: лабораторным и экспрессным. Лабораторные химические и физико-химические методы, как правило, не подходят для такой задачи по причине их сложности и удалённости. Поэтому широкое распространение получили различные экспресс приборы по анализу жидких сред, основанные на оптических, диэлектрических и других методиках [3, 8, 9].

Одним из важных параметров смазочных материалов являются кинематическая или динамическая вязкость. Связано это со следующими факторами:

- пониженная вязкость может приводить к повреждению движущихся частей механизма;
- повышенная вязкость может являться причиной снижения эффективности работы системы, засорения фильтров и пр.

По этим причинам для каждого механизма значение вязкости подбирается индивидуально. Но необходимо иметь в виду, что в дальнейшем при эксплуатации механизма это значение необходимо поддерживать на должном уровне, что сопряжено с рядом особенностей.

При изменении температуры от 0 до 100 °С вязкость масла может изменяться на несколько порядков, оно становится более жидким. При понижении температуры происходит обратный эффект. Параметр, который определяет как изменяются свойства среды при изменении температуры, носит название индекс вязкости.

Однако его использование ограничено температурными точками 40 и 100 °С, при которых индекс вязкости определяется согласно ASTM D 2270. Для многих смазочных материалов температурный интервал, в котором вязкость остаётся на требуемом уровне, необходимо подбирать индивидуально.

При рассмотрении системы смазки на примере ДВС можно выделить следующие факторы, на которые влияет вязкость масла:

- толщина образуемой масляной пленки в парах трения (надежность разделения трущихся поверхностей при высоких температурах, стойкость к разрушению до добавления противоизносных присадок);
- лёгкость пуска двигателя в холодную погоду;
- мощность двигателя и коэффициент полезного действия двигателя;
- количество осадков, образующихся в картерном масле;
- расход топлива;
- расход масла.

Для выявления температурных свойств масел необходимо проводить контроль изменения их вязкости в заданном интервале температур. Измерение кинематической вязкости масла производится при помощи вискозиметров, которые подразделяются на три основных типа: капиллярные; ротационные; прочие типы, к которым относятся приборы, измеряющие время падения шарика в жидкости, сопротивление вибрации зонда или давление, оказываемое жидкостью на зонд.

В качестве экспресс приборов наиболее распространены ротационные вискозиметры, а также другие [10, 11]. Среди параметров, характеризующих изменение вязкости с изменением температуры, чаще всего применяется индекс вязкости, определение которого производят путём измерения кинематической вязкости при 40 и 100 °С, а сам индекс опре-

деляют затем из таблиц по ASTM D 2270 или ASTM D 39B. Так как индекс вязкости определяется при 40 и 100 °С он не связан с низкотемпературной вязкостью, которую определяют вискозиметром Брукфильда и вискозиметрами высокой скорости сдвига.

Очень часто при эксплуатации техники известно в каких пределах лежит допустимый диапазон значений вязкости рабочей смазочной среды, и при анализе достаточно узнать эти значения.

Решить эту задачу способен метод лазерного фазового анализа (ЛФА), описанный в работах [12, 13], при помощи которого можно исследовать ряд параметров жидких нефтепродуктов, в том числе масел. Данный метод может быть легко реализован в виде компактного экспресс прибора. Отличительная особенность заключается в том, что с его помощью можно оперативно определять сразу несколько показателей исследуемой среды, например: содержание воды, точку застывания, механические примеси [12].

Сущность метода заключается в следующем. Жидкий образец помещают в кювету, присоединённую к термоэлементу. Поверхность образца непрерывно сканируется лазерным излучением. По изменению оптических свойств пробы в процессе изменения её температуры судят о значении искомого свойства пробы.

Определение параметров вязкости сред так же может быть осуществлено при помощи метода ЛФА. Для этого вводится механизм покачивания пробы. При покачивании угол наклона жидкости к лазерному лучу изменяется, что ведёт к изменению уровня принимаемого сигнала.

По величине отклонений можно определять насколько изменяется вязкость среды. Целью данной работы является разработка технологических основ определения степени изменения кинематической вязкости жидкой среды методом ЛФА. Решение этой задачи может позволить применять экспресс прибор на основе ЛФА для оперативного контроля параметров смазочных материалов, что особенно актуально для работоспособности техники, работающей в сложных условиях (например, строительная техника).

Методика исследований

Разработка методики оценки изменения вязкости жидких сред при изменении температуры основана на регистрации лазерного излучения, проходящего через среду, при периодическом отклонении положения поверх-

ности жидкости относительно оптического пути. Схема данного процесса показана на рис. 1.

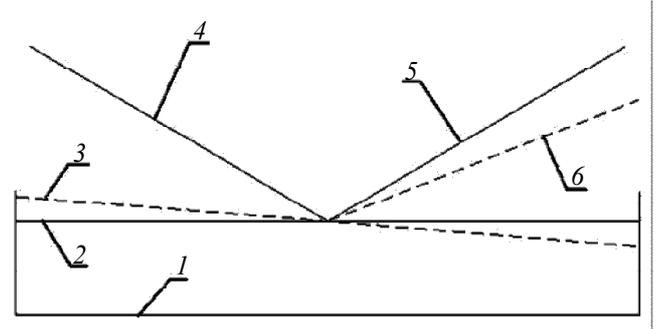


Рис. 1. Схема отклонения лазерного луча при покачивании кюветы:

1 – кювета с образцом; 2 – нормальное положение поверхности жидкости; 3 – наклонное положение поверхности жидкости; 4 – падающий луч; 5 – отражённый луч при нормальном положении кюветы; 6 – отражённый луч при наклонном положении кюветы

Реализуется этот процесс путём покачивания блока, содержащего кювету с образцом относительно остальной части исследовательского стенда (рис. 2), содержащей источник и приёмник лазерного излучения. При этом происходит свободное течение жидкости из начального положения в наклонное, скорость которого связана с динамической вязкостью вещества.

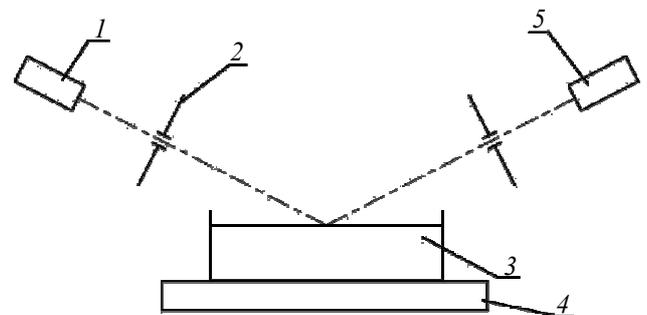


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – кювета с образцом; 4 – термоэлемент; 5 – приёмник излучения

Интенсивность лазерного излучения, проходящего через вещество в каждом положении кюветы будет изменяться, благодаря чему можно оценивать, в каком положении находится кювета в каждый момент времени. При повышении вязкости жидкости понадобится больше времени для перехода в конечное положение, что можно зафиксировать при помощи лазерного излучения. Путём оценки ам-

плитуды и времени колебаний интенсивности регистрируемого излучения в данной работе производилась оценка изменения вязкости.

Исследовательский стенд представляет собой лазерный нефелометр с возможностью изменения температуры среды. Излучение от непрерывного лазера 1 (вторая гармоника Nd:YAG) с длиной волны 532 нм после прохождения диафрагмы 2 попадало под углом в кювету 3, затем излучение проходило сквозь образец и отражалось от дна кюветы, сделанного зеркальным.

Менисковый эффект исключался тем, что кювета накрывалась прозрачной крышкой, соприкасавшейся с поверхностью образца. Благодаря встроенному элементу Пельтье 4, производилось изменение температуры образца. Диафрагма 2 пропускает излучение, распространяющееся в малом телесном угле относительно оптической оси. Излучение регистрировалось фотодиодным приемником 5. Для измерения температуры образца использовалась термопара.

Исходя из данных работы [13] скорость охлаждения образцов при проведении процесса устанавливалась на значении 7 °С/мин. При такой скорости достигалось достаточно равномерное застывание вещества. Погрешность измерения рассеянной мощности излучения составила порядка 5 %.

В качестве модельных сред использовалась вода и гидравлическое масло АМГ-10. Характер замораживания таких сред хорошо известен, либо изучался ранее [14]. Гидравлическое масло АМГ-10 изготавливается на основе специально подобранного высокоочищенного маловязкого нефтяного базового масла с ультранизкой температурой застывания.

Масло содержит эффективный загуститель с высокой стойкостью к деструкции и присадки, улучшающие антиокислительную стабильность, противоизносные и антикоррозионные свойства. Масло в качестве рабочей жидкости обеспечивает надежную эксплуатацию гидравлических систем и устройств, работающих в интервале температур окружающей среды от -60 до +55 °С.

В процессе исследования образцов происходит постоянное изменение угла наклона их поверхности относительно оптической схемы. По этой причине важным параметром для исследования является диаграмма направленности лазерного излучения. В данной работе использовался одномодовый лазерный излучатель с распределением близким к Гауссовому. «Хвосты» распределения отсекались диа-

фрагмой 2. Это позволяло не учитывать изменение распределения интенсивности при наклоне кюветы.

Кювета выполнена таким образом, чтобы при покачивании жидкость не выливалась за её пределы, одновременно с этим высота стенки не влияет на перекрытие лазерного излучения, что реализуется при помощи диафрагмы 2. Она отсекает диаметр пучка, не попадающий на стенку кюветы.

В процессе покачивания на поверхности жидкости происходят затухающие колебания, но стенд выполнен таким образом, чтобы минимизировать этот процесс путём плавного покачивания.

Проведение экспериментов

Экспериментальное исследование изменения вязкости жидких сред при изменении температуры производилось для двух сред: воды и гидравлического масла. Вода использовалась как опорная среда, необходимая для проверки методики, т.к. изменение её вязкости известно во всём диапазоне температур жидкого состояния. На рис. 3 показана зависимость ослабления лазерного излучения, проходящего через воду при её нагревании в диапазоне температур от +15 до -5 °С.

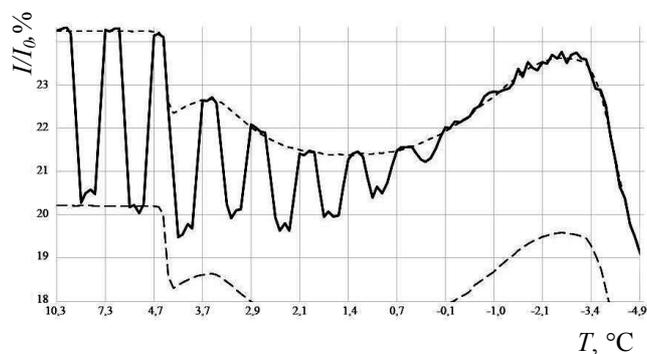


Рис. 3. Зависимость ослабления лазерного излучения при охлаждении воды (пунктирными линиями показаны аналогичные зависимости без покачивания кюветы для нормального и наклонного положения кюветы)

На рисунке видно, что амплитуда колебаний затухает при снижении температуры, что, по-видимому, связано с кристаллизацией воды и снижением её подвижности. Колебания прекращаются около 0 °С, что соответствует точке застывания воды. После проведения оценки затухания колебаний была построена зависимость снижения подвижности (рис. 4).

Непосредственно значения кинематической вязкости в данной работе не рассчитывались, однако используя зависимость, показанную на рис. 4, можно оценивать насколько процентов выросла вязкость, что имеет значение с точки зрения технологической применимости вещества.

Аналогичное исследование проводилось для гидравлического масла. Итоги оценки изменения вязкости для масла АМГ-10 представлены на рис. 5.

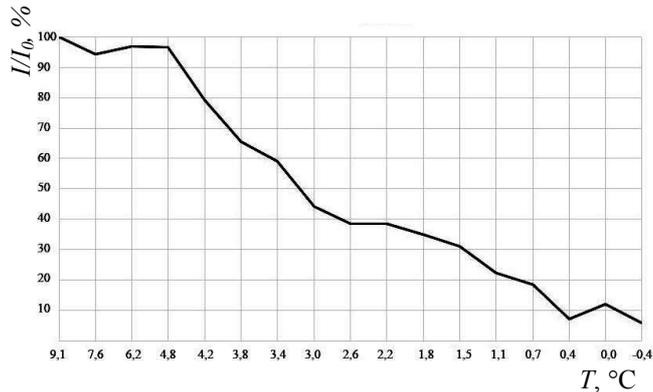


Рис. 4. Снижение текучести воды при замораживании

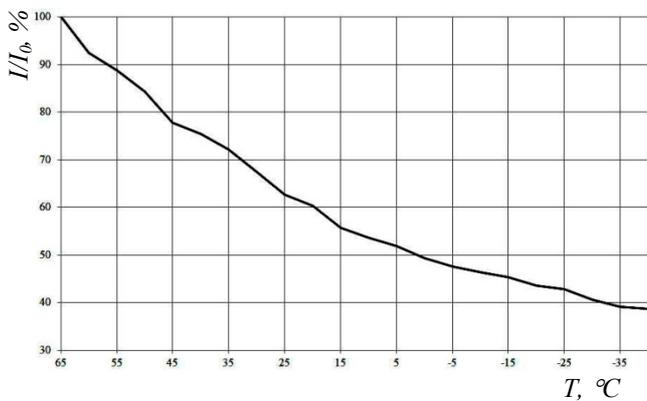


Рис. 5. Снижение текучести гидравлического масла при замораживании

Кривые, полученные способом, описываемом в данной работе (см. рис. 4 и 5) имеют большую информативность, чем такие показатели как индекс вязкости, так как позволяют оценить динамику изменения вязкости, что имеет первостепенное значение при использовании смазочных материалов при переменных температурных условиях эксплуатации.

Выводы

В данной работе была предложена методика оценки изменения вязкости жидких сред при изменении температуры. Разработка ме-

тодики базировалась на экспериментальном исследовании изменения интенсивности лазерного излучения, проходящего через среду, при периодическом отклонении положения поверхности жидкости относительно оптического пути. Получены кривые характеризующие рост вязкости при замораживании модельных сред: воды и гидравлического масла.

Разработанная методика может быть востребована при контроле смазочных материалов благодаря следующим характеристикам:

- точность измерений составляет порядка 5 %;
- время проведения одного измерения составляет порядка 10 мин, что позволяет считать методику экспрессной;
- методика может быть реализована в виде компактного экспресс прибора и применяться непосредственно на местах хранения и эксплуатации смазочных материалов;
- можно проводить контроль изменения вязкости в широком диапазоне температур от -50 до +150 °С.

Определение характера изменения вязкости смазочных материалов позволяет сделать вывод о возможности их использования в конкретных температурных условиях. Сопоставление с аналогичными калибровочными кривыми может стать критерием выявления степени отработки масла, так как наличие примесей и нарушение состава масла влияет на модель его замораживания [14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дунаев, А.В. Экспресс-контроль масла для снижения износов и предотвращения аварий моторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 16. – № 12. – С. 420–428.
2. Кустарёв, Г.В., Дудкин, М.В., Гурьянов, Г.А. Обеспечение чистоты и поддержание эксплуатационных свойств рабочих жидкостей гидропривода строительных и дорожных машин // Вестник МАДИ. – 2008. – № 2. – С. 43–47.
3. Крицкая, Е.Б., Чиж, Д.В. Физико-химические методы определения воды в нефтепродуктах // Успехи современного естествознания. – 2011. – №11. – С. 75.
4. Кузьмин, Н.А., Пачурин, Г.В., Кузьмин, А.Н. Анализ отложений в автомобильных двигателях. Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – С. 226.
5. Можаяев, О.С., Попов, Е.С. Топливная эффективность судового машинно-двигательного комплекса // Вестник АГТУ: сер. «Морская техника и технология». – 2014. – № 2. – С. 95 – 98.

6. **Martin Reik, Jung Frank.** Contamination of Lubrication Oils / Theo Mang // Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Vol.1. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. P. 292- – 313.

7. **Можаяев, О.С., Попов, Е.С.** Топливная эффективность судового машинно-двигательного комплекса // Вестник АГТУ; сер. «Морская техника и технология». – 2014. – № 2. – С. 95 – 98.

8. **Пат. 2243544 РФ.** Индикатор марки автомобильного бензина / А.В. Ляшенко, Э.И. Жалковский, В.А. Костяков; заявл. 26.03.2003; опубл. 27.12.2004.

9. **Пат. 2287811 РФ.** Прибор для экспресс-контроля качества автомобильного бензина / А.В. Ляшенко, Э.И. Жалковский, В.А. Костяков, заявл. 25.11.2005; опубл. 20.11.2006.

10. **Пат. 2263301 РФ.** Способ экспрессного определения кинематической вязкости авиационных керосинов и дизельных топлив / Е.И. Алатортцев, В.Н. Зрелов; заявл. 26.03.2003; опубл. 27.12.2004.

11. **Якимова, М.А., Алехнович, В.И., Григорьянц, А.Г.** Фотометрический контроль параметров коллоидных растворов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 3 (33). – С. 42 – 45.

12. **Мельников, Д.М., Шиганов, И.Н.** Влияние скорости охлаждения образцов на показатели метода лазерного фазового анализа // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 3(33). – С. 25 – 27.

13. **Шиганов, И.Н., Мельников, Д.М., Якимова, М.А.** Оборудование и методики лазерного экспресс-анализа нефтепродуктов // Фотоника. – 2016. – № 3. – С. 98 – 107.

14. **Мельников, Д.М., Шиганов, И.Н.** Определение вязкости моторных топлив методом лазерного фазового анализа // Технология машиностроения. – 2013. – № 10. – С. 47–50.

REFERENCES

1. Dunayev, A.V. Lubricating oil rapid control to reduce wear and prevent engine failure // *Mining Information-Analytical Bulletin*. – 2009. – Vol. 16. – № 12. – pp. 420–428.

2. Kustaryov, G.V. Dudkin, M.V., Gurianov, G.A. Ensuring cleanness and performance attributes support in working

liquids of hydraulic actuator in construction and road machinery // *Bulletin of MARI*. – 2008. – № 2. – pp. 43–47.

3. Krinitskaya, E.B., Chizh, D.V. Physical-chemical methods for water definition in oil products // *Success in Modern Natural Science*. – 2011. – № 11. – pp. 75.

4. Kuzmina, N.A., Pachurin, G.V., Kuzmin, A.N. Analysis of depositions in motor car engines. *Current Problems in Science and Education*. – 2014. – № 1. – pp. 226.

5. Mozhaiev, O.S., Popov, E.S. Fuel efficiency of ship engine-mover unit // *Bulletin of ASTU: set “Marine Equipment and Technology”*. – 2014. – № 2. – pp. 95 – 98.

6. Martin Reik, Jung Frank. Contamination of Lubrication Oils / Theo Mang // Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Vol.1. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. P. 292- – 313.

7. Mozhaiev, O.S., Popov, E.S. Fuel efficiency of ship engine-mover unit // *Bulletin of ASTU; Set “Marine Equipment and Technology”*. – 2014. – № 2. – pp. 95 – 98.

8. Pat. 2243544 RF. Indicator of motor gasoline brand / A.V. Lyashenko, E.I. Zhalkovsky, V.A. Kostyakov; applic. 26.03.2003; published. 27.12.2004.

9. Pat. 2287811 RF. Device for rapid test of engine gasoline quality / A.V. Lyashenko, E.I. Zhalkovsky, V.A. Kostyakov, applic. 25.11.2005; published 20.11.2006.

10. Pat. 2263301 RF. Method for rapid definition of kinematic viscosity of aviation kerosene and diesel oil / E.I. Alatorstsev, V.N. Zrellov; applic. 26.03.2003; published 27.12.2004.

11. Yakimova, M.A., Alekhovich, V.I., Grigoriyants, A.G. Photometric control of colloid solution parameters // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 3 (33). – pp. 42 – 45.

12. Melnikov, D.M. Shiganov, I.N. Impact of sample cooling rate upon indices of laser phase analysis method // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 3(33). – pp. 25 – 27.

13. Shiganov, I.N., Melnikov, D.M., Yakimova, M.A. *Equipment and Procedures for Laser Rapid Analysis of Oil Products* // Photonics. – 2016. – № 3. – pp. 98 – 107.

14. Melnikov, D.M., Shiganov, I.N. Definition of engine fuels viscosity by method of laser phase analysis // *Engineering Techniques*. – 2013. – № 10. – pp. 47–50.

Рецензент д.т.н. И.И. Артемов

