

Ю. М. Мацевитый*, академик НАН Украины

И. В. Гайшун**, академик НАН Беларуси

В. Т. Борухов**, д-р физ.-мат. наук

А. О. Костиков*, канд. техн. наук

* Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(Украина, г. Харьков, e-mail: kostikov@ipmach.kharkov.ua)

** Институт математики НАН Беларуси
(Беларусь, г. Минск, e-mail: borukhov@im.bas-net.by)

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Приведен обзор работ научных сотрудников Института проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины и Института математики НАН Беларуси, посвященных параметрической и функциональной идентификации тепловых процессов. Рассмотрены как теоретические работы, посвященные созданию и усовершенствованию методов решения обратных задач, так и практические, в которых упор делается на применение теории обратных задач в различных отраслях промышленности.

Наведено огляд праць навуковых супраб'ітніків Інституту проблем машынобудавання ім. А. М. Підгорного НАН України та Інституту математики НАН Беларусі, які присвячені параметричній та функціональній ідентифікації теплових процесів. Розглянуто як теоретичні роботи, що присвячені створенню та удосконаленню методів вирішення обернених задач, так і практичні, в яких наголос робиться на застосування теорії обернених задач в різних галузях промисловості.

Несмотря на то, что экспериментальные методы изучения теплофизических процессов являются самыми достоверными, они по ряду причин не могут служить исчерпывающим источником информации о тепловом состоянии исследуемого объекта. Например, при проведении диагностики различных технических объектов непосредственное измерение интересующих параметров довольно часто затруднено, а в ряде случаев (например, при неразрушающем контроле) – вообще невозможно. Следует также отметить весьма существенные временные и материальные затраты на экспериментальные исследования (особенно на этапе проектирования нового оборудования) по сравнению с аналогичными затратами на изучение теплового состояния средствами математического моделирования. Поэтому в настоящее время для определения температурных полей, условий теплообмена и других тепловых параметров все чаще применяются методы и средства математического моделирования и идентификации.

Естественное усиление ведущей роли математического моделирования в общетехнических исследованиях, в целом, и в исследовании теплофизических процессов, в частности, характеризуется ужесточением требований к методам моделирования, к их эффективности и простоте реализации. Однако какими бы методами и средствами не пользовался исследователь, результаты моделирования зависят, в первую очередь, от правильности выбора математической модели, т.е. от ее адекватности, в чем одну из главных ролей играет достоверность используемых условий однозначности. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяется решению обратных задач теплопроводности (ОЗТ), в которых по имеющимся (весьма ограниченным) сведениям о температуре тела можно определять теплофизические свойства и геометрические характеристики объекта, идентифицировать начальные и граничные условия, а также уточнять саму математическую модель явления. Иными словами, методология решения ОЗТ является мощнейшим средством как при идентификации параметров тепловых систем и процессов по косвенным их проявлениям, так и при оптимальном проектировании технических объектов.

Научные сотрудники Института проблем машиностроения НАН Украины и Института математики НАН Беларуси имеют многолетний опыт моделирования и идентификации тепловых процессов. Одним из фундаментальных направлений в данной области является совершенствование существующих и разработка новых методов решения ОЗТ. В ходе таких исследований основное внимание уделяется параметрической и функциональной идентификации тепловых процессов. Среди разработанных и усовершенствованных методов можно выделить методы автоматизированного подбора [1–5], спектральных функций влияния [1, 2, 6, 7], сосредоточенной ёмкости [1, 2, 8–10], градиентные методы минимизации целевых функционалов [11–19], обратных динамических систем [12, 20, 21, 31], субоптимальной поэтапной оптимизации [27], оптимальной динамической фильтрации [1, 2, 22–26] и др. [27–33]. При этом рассматривается широкий спектр применения ОЗТ при исследовании теплофизических процессов. Это относится к идентификации граничных [1, 2, 7, 12, 20, 21, 27, 34, 35] и начальных [1, 2, 12, 36] условий (граничные и ретроспективные ОЗТ), теплофизических [1–3, 5, 11–18, 29, 37–40] и геометрических [1, 2, 41–45] характеристик (внутренние и геометрические ОЗТ), к решению комбинированных [46–48] и обратных сопряженных задач теплопереноса [49–51], задач оптимального проектирования [52–56] и управления [12, 33, 57–59].

Коротко отметим особенности представленных подходов к решению ОЗТ.

Большинство из них основано на так называемом экстремальном подходе к решению ОЗТ. Необходимость его применения обусловлена тем, что в подавляющем числе обратных задач, которые выдвигает практика, математическая модель теплофизического процесса настолько сложна, что невозможно получить аналитическое решение прямой задачи и затем из него явным образом выразить решение обратной. Поэтому в процессе применения экстремального подхода обратная задача сводится к вариационной, в которой минимизируется целевой функционал, действующий в пространстве возможных решений. Метод автоматизированного подбора [1–5], упоминавшийся выше, по своей сути наиболее близок к такой процедуре, так как напрямую её реализует. В нём решения представляются в виде линейной комбинации базисных функций, и минимизация целевого функционала осуществляется в конечномерном пространстве коэффициентов при этих функциях. Отличительной особенностью от широкоизвестного метода функциональной идентификации Дж. Бека в данном случае является то, что помимо коэффициентов при базисных функциях искомым параметром является и их количество.

В методе спектральных функций влияния [1, 2, 6, 7] также искомая информация представляется в виде линейной комбинации известных базисных функций с неизвестными коэффициентами. Однако перед тем как начать подбор коэффициентов, находят отклики рассматриваемой системы на каждую базисную функцию (так называемые спектральные функции влияния). В случае линейной задачи теплопроводности такой подход позволяет свести задачу к задаче минимизации квадратичной формы. В нелинейном случае дополнительно применяется итерационный процесс.

Метод оптимальной динамической фильтрации, предложенный Р. Калманом, получил своё развитие применительно к ОЗТ в работах [1, 2, 22–26]. Для этого в схему решения была введена конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений, входящих в математическую модель рассматриваемого физического процесса, что позволило получить так называемый дискретный фильтр.

Введение в исходную математическую модель членов, отражающих понятие сосредоточенной теплоёмкости, которая впервые была предложена А. Н. Тихоновым, позволило разработать соответствующий метод решения обратных задач [1, 2, 8–10].

В работах [11–19] развивается метод функциональной идентификации для восстановления коэффициентов нелинейных уравнений теплопроводности, основанный на вычислении градиентов в бесконечномерных пространствах Лебега или Соболева для функционалов качества задачи. Численная реализация процедуры вычисления таких градиентов стала возможной в силу предложенного в [16, 17] нового способа построения сопряженных опера-

торов к операторам внутренней суперпозиции. Разработанные в [11–19] численные алгоритмы позволяют восстанавливать по зашумленным данным измерений температурных полей негладкие коэффициенты, что представляется особо важным для задач теплопроводности с фазовыми превращениями [29].

В задачах управления тепловыми процессами возникает требование обработки данных в реальном масштабе времени. Для задач идентификации внутренних источников и граничных режимов переноса тепла этому требованию удовлетворяют методы обратных динамических систем [12, 20, 21, 30, 31, 60, 61] и субоптимальной поэтапной оптимизации [27]. Отметим, что в ряде случаев эти методы позволяют представить решение обратной задачи ОЗТ в аналитическом виде в терминах полугрупп класса C [12, 61].

В ходе выполняемых работ помимо разработки и теоретического обоснования того или иного метода рассматриваются и вопросы реализации этих методов с использованием современных компьютерных технологий [62–64].

Поскольку ОЗТ, как и другие обратные задачи, зачастую являются некорректными, то вопросам корректности их постановки и путям регуляризации решений некорректных задач [1, 2, 12, 65–68], а также структурным свойствам – обратимости, управляемости и наблюдаемости динамических систем [12, 19–21, 30–33, 63, 69–75] – также уделено должное внимание. В частности, в работах [12, 21, 61] получены критерии обратимости распределенных динамических систем. Метод динамической оценки состояний и критерии наблюдаемости состояний для различных классов линейных систем представлены в работах [12, 32, 69–75]. Задачи реализации динамических систем рассматривались в работах [12, 32, 74]. Среди используемых методов регуляризации можно выделить как применение традиционных (например, регуляризирующий функционал А. Н. Тихонова, итерационная регуляризация О. М. Алифанова), так и оригинальных методов. Например, в геометрических ОЗТ в результате введения параметризации искомой геометрической информации таким образом, чтобы параметры имели вполне определённый геометрический смысл, легко на каждый из этих параметров наложить ограничения, сводящие множество возможных решений к компакту [68]. Для получения регулярных решений ОЗТ методом оптимальной динамической фильтрации был предложен целый ряд модификации фильтра, в том числе итерационный, усечённый и адаптивный [1, 2, 22–26], которые позволяют получить более точные и устойчивые результаты при снижении требований к быстродействию и объёму памяти вычислительных средств. За счёт этого, помимо всего прочего, была достигнута возможность применять оптимальную динамическую фильтрацию при решении задачи в реальном масштабе времени. К методам решения ОЗТ, способным работать в режиме реального времени, относится и метод спектральных функций влияния [1, 2, 6, 7] за счёт того, что спектральные составляющие необходимо рассчитывать только один раз и это можно сделать заранее. При вычислении спектральных функций влияния можно организовать также распараллеливание вычислительного процесса, так как они не зависят друг от друга.

Разработанные методы идентификации не только протестированы путём решения серии модельных примеров, но и применены для решения важных практических задач, связанных с определением теплофизических свойств материалов [12–19, 76–78], проектированием и диагностикой объектов энергомашиностроения [79–81], нетрадиционной энергетики [82–84] и приборостроения [85–86], а также с разработкой технологических процессов в металлургии [28, 87, 88], металлообработке [89–91] и в др. предметных областях промышленности [92–99].

Литература

1. *Мацевитый Ю. М.* Обратные задачи теплопроводности: В 2-х т. Т. 1. Методология / Ю. М. Мацевитый. – Киев: Наук. думка, 2002. – 405 с.
2. *Matsevity Yu. M.* Inverse Heat Conduction Problems: In 2 vol. Vol. 1 Methodology / Yu. M. Matsevity. – Kyiv: Naukova Dumka, 2008. – 428 p.
3. *Мацевитый Ю. М.* Идентификация теплофизических свойств твердых тел / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.

4. *Идентификация* внешних и внутренних параметров теплопереноса путем решения обратной задачи теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко, А. В. Москальцов и др. // Теплообмен-VI. – 1980. – Т. IX. – С. 119–124.
5. *Автоматизированный* подбор при идентификации температурной зависимости теплопроводности теплоизоляционных материалов / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко, В. Е. Ведь, В. А. Иванов // Интегровані технології та енергозбереження. – 2004. – № 1. – С. 50–55.
6. *Мацевитый Ю. М.* Спектральные функции влияния в многомерных обратных задачах теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, О. С. Цаканян // Докл. АН УССР. – 1986. – Сер. А. – № 5. – С. 72–77.
7. *Мацевитый Ю. М.* Идентификация граничных тепловых воздействий с помощью спектральных функций / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, О. С. Цаканян // Инж.-физ. журн. – 1987. – Т. 53, № 3. – С. 480–486.
8. *Ержанов Г. Ж.* Сосредоточенная емкость в задачах теплофизики и микроэлектроники / Г. Ж. Ержанов, Ю. М. Мацевитый, У. М. Султангазин, В. П. Шерышев. – Киев: Наук. думка, 1992. – 296 с.
9. *Мацевитый Ю. М.* Моделирование теплофизических процессов с использованием концепции сосредоточенной емкости. III. Идентификация параметров иерархических моделей / Ю. М. Мацевитый, В. П. Шерышев // Электрон. моделирование. – 1992. – Т. 14, № 3. – С. 15–19.
10. *Мацевитый Ю. М.* Концепция сосредоточенной емкости в задачах идентификации тепловых процессов / Ю. М. Мацевитый, В. П. Шерышев // Теплообмен ММФ-92, II Минск: Междунар. форум, 1992. – Т. IX, 4.1. – С. 132–135.
11. *Borukhov V. T.* The functional identification approach for numerical reconstruction of the temperature-dependent thermal-conductivity coefficient / V. T. Borukhov, V. A. Tsurko, G. M. Zayats // Intern. J. Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52. – P. 232–238.
12. *Борухов В. Т.* Структурные свойства динамических систем и обратные задачи математической физики / В. Т. Борухов, И. В. Гайшун, В. И. Тимошпольский. – Минск: Белорусская наука, 2009. – 174 с.
13. *Борухов В. Т.* Идентификация коэффициента теплопроводности в нелинейном параболическом уравнении с возмущенными входными данными / В. Т. Борухов, Г. М. Заяц, В. А. Цурко // Информатика. – 2008. – № 4. – С. 29–38.
14. *Борухов В. Т.* Нелинейная обратная задача теплопроводности с неединственным решением / В. Т. Борухов, Г. М. Заяц, В. А. Цурко // Междунар. мат. конф. Еругинские чтения XII : Сб. науч. тр. – 2007. – С. 30–35.
15. *Борухов В. Т.* Инвариантная форма функциональной идентификации коэффициентов теплопроводности / В. Т. Борухов, И. В. Гайшун, В. И. Тимошпольский // Докл. НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 6. – С. 30–33.
16. *Борухов В. Т.* Функциональная идентификация градиентными методами нелинейного коэффициента теплопроводности. I. Сопряженные операторы / В. Т. Борухов, В. И. Тимошпольский // Инж.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 4. – С. 68–74.
17. *Функциональная* идентификация градиентными методами нелинейного коэффициента теплопроводности. II. Численное моделирование / В. Т. Борухов, В. И. Тимошпольский, Г. М. Заяц, В. А. Цурко // Инж.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 4. – С. 75–81.
18. *Восстановление* нелинейных коэффициентов теплопроводности методом функциональной идентификации / В. Т. Борухов, В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман и др. // Проблемы управления и приложения (Техника, производство, экономика): Сб. тр. междунар. конф., Минск, 16–20 мая 2005 г. – 2005. – Т. 1. – С. 120–127.
19. *Борухов В. Т.* Линейные дифференциальные системы с изменяющейся структурой / В. Т. Борухов, И. В. Гайшун // Докл. НАН Беларуси. – 2000. – Т. 44, № 5. – С. 30–33.
20. *Борухов В. Т.* Применение неклассических краевых задач для восстановления граничных режимов процессов переноса / В. Т. Борухов, В. И. Корзюк // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. I. – 2000. – № 3. – С. 469–474.
21. *Борухов В. Т.* Восстановление потоков тепла при дифференциальном измерении температуры методом обратных динамических систем // Инж.-физ. журн. – 1984. – Т. 47, № 3. – С. 469–474.
22. *Мацевитый Ю. М.* Идентификация в задачах теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский. – Киев: Наук. думка, 1982. – 240 с.
23. *Мацевитый Ю. М.* Применение метода оптимальной фильтрации при решении нелинейных задач теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, В. А. Малярченко, А. В. Мултановский // Пробл. машиностроения. – Киев: Наук. думка, 1977. – Вып. 5. – С. 61–65.
24. *Мацевитый Ю. М.* Итерационный фильтр для решения обратной задачи теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский // Инж.-физ. журн. – 1978. – Т. 45, № 5. – С. 916–923.
25. *Мацевитый Ю. М.* Статистическая идентификация локальных параметров теплообмена / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский // Инж.-физ. журн. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 806–809.

26. *Мацевитый Ю. М.* Моделирование тепловых процессов и идентификация локальных параметров теплообмена с помощью адаптивного итерационного фильтра / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский, В. М. Тимченко // Теплофизика высоких температур. – 1992. – Т. 30, № 1. – С. 82–91.
27. *Борухов В. Т.* Отслеживание заданной программы взвешенных температур и восстановление коэффициентов теплообмена / В. Т. Борухов, О. И. Костюкова, М. А. Курдина // Инж.-физ. журн.. – 2010. – Т. 83. – С. 584–592.
28. *Численное моделирование процессов охлаждения и затвердевания непрерывно литого стального слитка* / В. И. Тимошпольский, С. В. Баханович, В. Т. Борухов и др. // Докл. НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 3. – С. 115–120.
29. *Определение нелинейного коэффициента теплопроводности для изделий трубчатой формы методом функциональной идентификации* / В.Т. Борухов, В. И. Тимошпольский, Г. М. Заяц и др. // Инж.-физ. журн., 2006. – Т. 79, № 6. – С. 23–30.
30. *Структурные свойства динамических систем и обратные задачи математической физики* / В.Т. Борухов, В. И. Тимошпольский, Г. М. Заяц и др. // Инж.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 2. – С. 3–15.
31. *Борухов В. Т.* Сведение одного класса обратных задач теплопроводности к прямым начально-краевым задачам / В. Т. Борухов, П. Н. Вабищевич, В. И. Корзюк // Инж.-физ. журн. – 2000. – Т. 73, № 4. – С. 744–747.
32. *Борухов В. Т.* Обратная спектральная задача Штурма–Лиувилля в теории реализации линейных динамических систем / В. Т. Борухов // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 4. – С. 13–21.
33. *Гайшун И. В.* Многопараметрические системы управления / И. В. Гайшун. – Минск: Наука и техника. 1996. – 200 с.
34. *Мацевитый Ю. М.* Регионально-аналитическая идентификация теплового потока на поверхности конструктивного элемента / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, В. А. Ганчин // Теплообмен: ММФ-96, Минск, 1996. – Т. IX. – С. 11–18.
35. *Мацевитый Ю. М.* Идентификация переменных во времени коэффициентов теплоотдачи путем решения нелинейной обратной задачи теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, В. А. Маляренко, А. В. Мултановский // Инж.-физ. журн. – 1978. – Т. 35, № 3. – С. 505–509.
36. *Мацевитый Ю. М.* Определение начального распределения температуры в теле методом оптимальной динамической фильтрации / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский // Инж.-физ. журн. – 1978. – Т. 35, № 4. – С. 713–717.
37. *Мацевитый Ю. М.* Решение внутренней обратной задачи теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко // Энерг. машиностроение. – 1981. – Вып. 3 1. – С. 81–85.
38. *Мацевитый Ю. М.* Определение теплопроводности материалов путем автоматизированного решения внутренней обратной задач / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко // Пром. теплотехника. – 1986. – № 4. – С. 51–56.
39. *Мацевитый Ю. М.* Определение удельной теплоемкости и материалов методами обратных задач теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко // Пром. теплотехника. – 1988. – № 1. – С. 83–87.
40. *Мацевитый Ю. М.* Применение метода оптимальной фильтрации для идентификации коэффициента теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский, М. Рекада // Энерг. машиностроение. – 1984. – Вып. 38. – С. 56–61.
41. *Мацевитый Ю. М.* Определение толщины теплопроводящей стенки при помощи решения геометрической обратной задачи теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, А. О. Костиков // Пробл. машиностроения. – 1998. – Т. 1, № 3–4. – С. 52–59.
42. *Костиков А. О.* Единый методологический подход к постановке и решению геометрических обратных задач теплопроводности / А. О. Костиков // Пробл. машиностроения 2004. – Т. 7, № 4. – С. 52–60.
43. *Костіков А. О.* Методика визначення місцеположення границі двовимірної області за допомогою розв’язання геометричної оберненої задачі теплопровідності / А. О. Костіков // Пробл. машиностроения. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 24–32.
44. *Мацевитый Ю. М.* Геометрические обратные задачи теплопроводности – современное состояние проблемы / Ю. М. Мацевитый, А. О. Костиков // Пробл. машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 23–36.
45. *Костиков А. О.* Математические аспекты решения геометрических обратных задач теплопроводности: проблемы и пути их решения / А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Пробл. машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 3. – С. 27–34.
46. *Одновременная идентификация различных параметров тепловых систем* / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский, С. Ф. Лушпенко, М. Рекада // Тепло-массообмен-VII. – 1984. – С. 98–101.

47. *Мацевитый Ю. М.* Определение мощности внутренних источников энергии и коэффициента теплообмена в трехмерных системах / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, А. В. Москальцов // Докл. АН УССР. – 1985. – Сер. А, № 8. – С. 75–78.
48. *Мацевитый Ю. М.* Решение многопараметрических обратных задач теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский // Инж.-физ. журн. – 1991. – Т. 60, № 1. – С. 136–144.
49. *Мацевитый Ю. М.* Обратные сопряженные задачи теплопереноса / Ю. М. Мацевитый, А. О. Костиков // Пробл. машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 5. – С. 19–26.
50. *Мацевитый Ю. М.* Некоторые подходы к постановке и решению обратных задач теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко, А. О. Костиков // Тепловые процессы в технике. – 2009. – Т. 1, № 5. – С. 186–194.
51. *Определение* эквивалентной теплопроводности многоместной герметичной корзины хранения отработавшего ядерного топлива путем решения обратной задачи / С. В. Алёхина, В. А. Воронина, В. М. Голощапов, А. О. Костиков / Ядерная радиационная безопасность. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 48–51.
52. *Мацевитый Ю. М.* Назначение тепловых источников на фиксированные места с учетом ограничений на температурное поле / Ю. М. Мацевитый, А. О. Костиков // Пробл. машиностроения. – 1999. – Т. 2, № 3–4. – С. 63–72.
53. *Идентификация* зон возможного размещения тепловых объектов при наличии областей запрета / Ю. М. Мацевитый, В. П. Путятин, А. О. Костиков // Пробл. машиностроения. – 2000. – Т. 3, № 1–2. – С. 45–51.
54. *Matsevity Yu. M.* Geometrical inverse heat transfer problems and therophysical design of system / Yu. M. Matsevity, A. O. Kostikov // Proc. of the VIth Intern. Conf. CADSM 2001, Lviv-Slavsko, Ukraine. – P. 31–36.
55. *Геометрические* обратные задачи теплопроводности: последовательное размещение тепловых источников / Ю. М. Мацевитый, Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин, А. О. Костиков // Электрон. моделирование. – 2002. – Т. 24, № 2. – С. 99–105.
56. *Размещение* разнотипных тепловых объектов на фиксированные места при решении геометрических обратных задач теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин, А. О. Костиков // Электрон. моделирование. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 3–10.
57. *Мацевитый Ю. М.* Спектральные функции влияния граничных воздействий в задачах управления тепловыми объектами / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, О. С. Цаканян // Инж.-физ. журн. – 1989. – № 6. – С. 974–977.
58. *Мацевитый Ю. М.* Обратные задачи теплопроводности по идентификации и управлению тепловыми процессами / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, Н. А. Сафонов // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену, 19–23 мая 2008 г.: Тез. докл. и сообщений. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 27–29.
59. *Мацевитый Ю. М.* Оптимизация теплотехнологических процессов с использованием методов управления и идентификации / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский, И. А. Немировский // Инж.-физ. журн. – 1990. – № 2. – С. 298–308.
60. *Borukhov V. T.* Numerical solution of the inverse problem of reconstructing distributed right-hand side of parabolic equation / V. T. Borukhov, P. N. Vabishchevich // Computer Physics Communications. – 2000. – Vol. 126, № 1–2. – P. 32–36.
61. *Borukhov V. T.* Method of inverse dynamical systems and its application for recovering internal heat sources / V. T. Borukhov, P. M. Kolesnikov // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1988. – Vol. 31, № 8. – P. 1549–1556.
62. *Matsevity Yu. M.* Adaptation of the PHOENICS software system for problems of investigating thermal regimes of spacecraft electronic equipment / Yu. M. Matsevity, S. F. Lushpenko, A. O. Kostikov // Proc. of fourth Ukraine-Russia-China Sympos. on Space Science and Technology. – Kiev. – 1996. – Vol. 2. – P. 747–749.
63. *Matsevity Yu. M.* Solving Inverse Problems of Mathematical Physics by Means of the PHOENICS Software Package / Yu. M. Matsevity, S. F. Lushpenko // Roc. of the 4th Int. Colloq. On Process Simulation, Espoo, 11–13 June, 1997. Espoo. – 1997. – P. 249–259.
64. *Костиков А. О.* Использование программного комплекса решения задач теплопереноса PHOENICS для определения коэффициента теплоотдачи / А. О. Костиков // Электрон. моделирование. – 1999. – Т. 21, № 2. – С. 96–104.
65. *Мацевитый Ю. М.* Сплайн-идентификация теплофизических процессов / Ю. М. Мацевитый, Е. Н. Бут. – Киев: Наук. думка, 2010. – 240 с.
66. *Мацевитый Ю. М.* Регионально-теоретическое моделирование и идентификация тепловых потоков с использованием метода регуляризации А. Н. Тихонова / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, В. В. Ганчин // Пробл. машиностроения. – 1999. – Т. 2, № 1–2. – С. 34–42.

67. *Мацевитый Ю. М.* К вопросу о некорректности постановки обратной задачи теплопроводности / Ю. М. Мацевитый, Е. Н. Бут, А. О. Костиков // Пробл. машиностроения. – 2002. – Т. 5, № 4. – С. 44–50.
68. *Костиков А. О.* Получение устойчивых решений геометрических обратных задач теплопроводности за счет параметризации искомым характеристик / А. О. Костиков // Пробл. машиностроения. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 39–44.
69. *Гайшун И. В.* Об асимптотическом оценивании состояний линейных нестационарных систем со скалярным выходом / И. В. Гайшун // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. – 2006. – Т. 12, № 2. – С. 47–52.
70. *Гайшун И. В.* Асимптотическое оценивание состояний двухпараметрических дискретных систем / И. В. Гайшун // Докл. НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 4. – С. 33–35.
71. *Гайшун И. В.* Асимптотические идентификаторы состояний нестационарных линейных дискретных систем со скалярным выходным сигналом / И. В. Гайшун // Дифференц. уравнения. – 2007. – Т. 43, № 11. – С. 1561–1569.
72. *Гайшун И. В.* Условия наблюдаемости дифференциальных систем в дифференциальном кольце / И. В. Гайшун // Докл. НАН Беларуси. – 2008. – Т. 52, № 6. – С. 10–13.
73. *Гайшун И. В.* Наблюдаемость линейных дифференциальных систем, заданных в дифференциальных кольцах / И. В. Гайшун // Дифференц. уравнения. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 665–672.
74. *Гайшун И. В.* Восстановление линейных нестационарных дискретных систем по реакции на импульсные входные воздействия / И. В. Гайшун // Дифференц. уравнения. – 2010. – Т. 46, № 1. – С. 124–128.
75. *Гайшун И. В.* О нулевой динамике одного класса линейных распределенных дискретных систем / И. В. Гайшун // Тр. Ин-та математики и механики Ур. РАН. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 57–62.
76. *Зависимость коэффициента теплопроводности поликристаллических сверхтвердых материалов от температуры* / Ю. М. Мацевитый, А. И. Грабченко, С. Ф. Лушпенко, Е. В. Островерх // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 1. – С. 24–27.
77. *Определение теплопроводности керамических материалов с помощью решения обратной задачи теплопроводности* / Ю. М. Мацевитый, В. Е. Вель, В. А. Иванов, С. Ф. Лушпенко // Инж.-физ. журн. – 1991. – Т. 60, № 5. – С. 816–821.
78. *Определение теплопроводности аморфных металлических сплавов* / Ю. М. Мацевитый, В. А. Барсуков, Г. М. Коваль, С. Ф. Лушпенко // Инж.-физ. журн. – 1992. – Т. 63, № 3. – С. 314–320.
79. *Повышение энергоэффективности работы турбоустановок ТЭС и ТЭЦ путём модернизации, реконструкции и совершенствования режимов их эксплуатации* / Ю. М. Мацевитый, Н. Г. Шульженко, В. Н. Голощапов и др. : Под общ. ред. Ю. М. Мацевитого. – Киев: Наук. думка, 2008. – 366 с.
80. *Обеспечение устойчивого функционирования энергетического комплекса Украины на основе инновационных технологий* / Ю. М. Мацевитый, В. В. Соловей, Н. Г. Шульженко и др. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 3 (13). – С. 9–13.
81. *Альохіна С. В.* Тепловий стан вентильованих контейнерів із відпрацьованими тепловиділяючими збірками реактора ВВЕР-1000 / С. В. Альохіна, В. М. Голощапов, А. О. Костіков // Пробл. безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2009. – Вип. 11. – С. 36–41.
82. *Костиков А. О.* Утилизация теплоты действующих терриконов путём создания естественной тяги / А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый, А. И. Ценципер // Пробл. машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 12–17.
83. *Костиков А. О.* Влияние теплового состояния грунта на эффективность работы теплонасосной установки с грунтовым теплообменником / А. О. Костиков, Д. Х. Харлампиди // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2009. – № 1. – С. 32–40.
84. *Ценципер А. І.* Одержання теплової енергії з ліквідованих нафтогазових свердловин / А. І. Ценципер, А. О. Костіков, В. М. Голощапов // Нафтова і газова пром-сть. – 2009. – № 3. – С. 41–43.
85. *Теплофизическое проектирование металлокерамических нагревательных элементов* / Ю. М. Мацевитый, А. О. Костиков, В. Е. Овчаренко, О. С. Цаканян // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектрон. аппаратуры. – 1993. – Вып. 2. – С. 54–60.
86. *Matsevity Yu. M.* Thermal designing of ceramic printed circuit board with micro-cannel cooling system / Yu. M. Matsevity, A. O. Kostikov // Proc. Of 5th Shino-Russian-Ukrainian Sym. on Space Sci. and Technology, Harbin, China, June 6–9, 2000.– Habrin Institute of Technology.– 2000.– P. 738–743.
87. *Мацевитый Ю. М.* Решение внешней обратной задачи теплопроводности в условиях контакта охлаждаемых элементов металлургического оборудования с расплавами черных и цветных металлов

- / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский, И. А. Немировский // Пром. теплотехника.– 1983 – Т. 5, № 5. – С. 16–20.
88. *Вычислительный эксперимент по идентификации тепловых нагрузок на элементы металлургического оборудования* / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский, В. М. Тимченко, И. В. Ельчищева // Теплообмен ММФ-92, II Минск: Междунар. форум, 1992. – Т. IX, 4.2. – С. 119–122.
89. *Рациональная организация процесса термоупрочнения проката на основе решения внешней обратной задачи теплопроводности* / Ю. М. Мацевитый, Э. Г. Братуга, А. В. Мултановский, Ю. А. Селихов // Инж.-физ. журн. – 1989. – № 3. – С. 427–432.
90. *Управляемый теплообмен в процессах термообработки стали* / В. Т. Борухов, Э. Т. Брук-Левинсон, М. А. Геллер и др. – Минск, 1990. – 31 с. (Препринт / Ин-т тепло- и массообмена АН БССР. № 24).
91. *Борухов В. Т. Управление температурным режимом на поверхности плоских тел* / В. Т. Борухов, Л. Е. Борисевич, А. П. Елистратов. // Весці АН БССР. – Сер. Энерг. навук. – 1989. – № 1. – С. 32–36.
92. *Мацевитый Ю. М. Регионально-аналитическое моделирование и идентификация тепловых процессов в элементах двигателя внутреннего сгорания* / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, В. В. Ганчин // Теплообмен ММФ-2000: Тр. IV Минск. междунар. форума, 22-26 мая 2000.– Ин-т тепло- и массообмена НАН Беларуси.–2000. – 3. – С. 143–146.
93. *Численно-аналитическое моделирование и идентификация теплообмена в панелях модулей негерметичных космических аппаратов* / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, А. О. Костиков, Н. М. Курская // Электрон. моделирование. – 2006. – Т. 28, № 6. – С. 3–16.
94. *Мацевитый Ю. М. Идентификация и моделирование теплофизических процессов в строительных конструкциях при экстремальных тепловых воздействиях* / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, Н. А. Сафонов // Доп. НАН України. – 2007. – № 2. – С. 82–86.
95. *Идентификация изменения температуры пламени и моделирование температурных полей в элементах сложного сечения строительных конструкций* / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, Н. А. Сафонов, Т. В. Бутенко. // Тр. Четвёртой Рос. нац. конф. по теплообмену 23-27 окт. 2006 г., (РНКТ-4). М. Т. 7. Радиационный и сложный теплообмен. Теплопроводность, теплоизоляция. – С. 280–283.
96. *Мацевитый Ю. М. Идентификация и моделирование теплофизических процессов в строительных конструкциях при экстремальных тепловых воздействиях* / Ю. М. Мацевитый, А. П. Слесаренко, Н. А. Сафонов // Доп. НАН України. – 2007. – № 2. – С. 82–86.
97. *Диагностика разрушения охлаждаемых кессонированных стеновых элементов на основе идентификации условий теплообмена* / Ю. М. Мацевитый, А. В. Мултановский, В. М. Тимченко, И. В. Ельчищева // Пром. теплотехника. – 1991. – Т. 13, № 3. – С. 3–12.
98. *Моделирование теплопереноса при активационном отжиге арсенидгаллиевых полупроводниковых пластин* / Ю. М. Мацевитый, Н. А. Балашова, А. В. Мултановский и др. // Теплофизика высоких температур. – 1992. – Т. 30, № 3. – С. 601–608.
99. *Борухов В. Т. Оптимизация работы башенной испарительной градирни при внешних аэродинамических воздействиях* / В. Т. Борухов, С. П. Фисенко // Инж.-физ. журнал. – 1992. – Т. 63, № 6. – С. 678–683.

Поступила в редакцию
11.05.11