



## Методика, методы и модели для предварительного аэродинамического проектирования летательных аппаратов в условиях параметрической неопределенности

Г.С. Вересников, Л.А. Панкова, В.А. Пронина (ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН),  
И.Г. Башкиров (ЦАГИ)

Разработаны методика, методы и модели, а также программные средства, позволяющие решать многокритериальные оптимизационные задачи на ранних этапах проектирования летательных аппаратов (ЛА) при наличии входных и проектируемых параметров с эпистемической и алеаторной неопределенностью. Использование данных разработок позволит сократить время и стоимость, повысить информативность этапа предварительного проектирования нового поколения ЛА. В качестве примера приводятся результаты решения задач расчета весовых параметров ЛА и оптимальных параметров силовой установки, обеспечивающих удовлетворение требований по дальности сверхзвукового крейсерского полета и приоритетных тактико-технических требований в области дозвуковых скоростей полета.

Ключевые слова: предварительное проектирование, летательный аппарат, теория неопределенности, статистическое моделирование, генетический алгоритм.

### Введение

Разработка эффективных программных средств для автоматизации процесса проектирования летательных аппаратов (ЛА) является основой повышения качества, сокращения сроков и снижения стоимости разработки. Существующие методы проектирования ЛА используют детерминированные алгоритмы (исходные данные представлены конкретными значениями параметров, отражающими уровень технологий, аэродинамических характеристик и т.д.). В настоя-

щее время на программном рынке наиболее известна коммерческая программа для «прямого» аэродинамического расчета Aircraft Performance Program (APP.6), разработанная в Швейцарии и основанная на применении детерминированных алгоритмов.

Для предварительного проектирования летательных аппаратов, как правило, исходные данные – это результат экспертной оценки или статистической обработки, то есть не заданы точно. Когда детерминированные значения параметров неизвестны, применение моделей расчета и многокритериальной оп-

тимизации, предназначенных для вычислений с точными значениями, может привести к неэффективным или недопустимым решениям. При создании реального образца ЛА технические требования (ТТ) заказчика, скорее всего, не будут обеспечены в полной мере.

Существует два типа неопределенности (неточности), отражающие недетерминированность, – алеаторная (объективная) и эпистемическая (субъективная). Алеаторная неопределенность возникает, когда информация о случайных параметрах накоплена в статистических данных и параметры моделируются случайными величинами с заданными распределениями. Эпистемическая неопределенность возникает, когда информацию о параметре получают от экспертов, при этом параметр может быть либо случайным, но отсутствуют или недостаточно статистических данных, либо детерминированным, но его значение к настоящему моменту неизвестно. Параметры с эпистемической неопределенностью могут быть представлены нечеткими, возможностными, неопределенными и другими величинами. Для представления эпистемической неопределенности существует более 20 теорий [1].

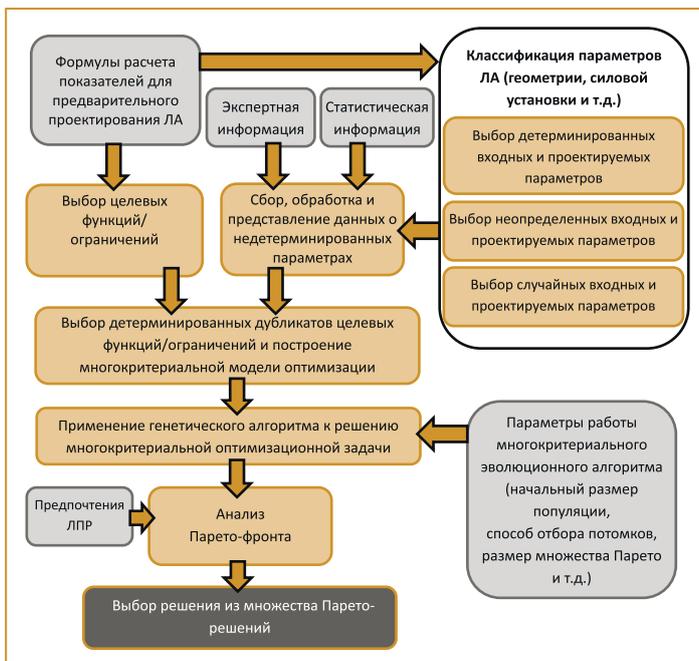


Рис. 1. Методика решения оптимизационных задач предварительного проектирования ЛА в условиях смешанной неопределенности

В качестве основы решения задач проектирования ЛА была выбрана теория неопределенности Б. Лю [2], которая обеспечивает эффективные методы вычислений с эпистемическими параметрами для достаточно широкого класса функций. Теория неопределенности успешно применялась при решении экономических и финансовых задач [3–6]. В теории неопределенности эпистемическая неопределенность моделируется субаддитивной (в отличие от аддитивной вероятностной меры) мерой неопределенности — степенью уверенности эксперта.

Принятие решений в предварительном проектировании, как правило, происходит в условиях смешанной неопределенности, когда присутствуют параметры как случайные, так и эпистемические.

На основе теории неопределенности [1] были разработаны методика, методы и модели, а также созданы программные средства, позволяющие решать задачи предварительного проектирования ЛА при наличии входных и проектируемых параметров с эпистемической и алеаторной неопределенностью.

#### Методика решения оптимизационных задач предварительного проектирования ЛА в условиях параметрической неопределенности

Предлагаемая методика решения оптимизационных задач с ограничениями предполагает использование моделей оптимального проектирования (в том числе робастного проектирования) при наличии параметров с неопределенностью, разработанных в [7–8].

На рис. 1 представлена методика, которая была реализована и опробована при решении некоторых задач предварительного проектирования ЛА.

Формализация оптимизационных задач проектирования ЛА начинается с перехода от заданных ТТ к выбору критериев оптимизации — целевых функций, отражающих степень удовлетворения ТТ. Определяются входные и проектируемые параметры, а также ограничения, которым должны удовлетворять проектируемые параметры.

Далее входные и проектируемые параметры классифицируются по типу неопределенности: детерминированные, случайные и неопределенные.

После сбора информации о недетерминированных параметрах формируются функции распределения неопределенности и вероятности.

Далее выбираются модели оптимизации с неточными параметрами. Эти модели сводятся к детерминированным моделям посредством замены целевых функций и ограничений с неопределенными параметрами их детерминированными дубликатами, выбранными лицом, принимающим решение (ЛПР). Если функции ограничений включают неопределенные параметры, и они должны выполняться при любом значении неопределенных параметров, выбирается тип ограничений — «жесткие». Если функции ограничений должны выполняться с заданным значением меры неопределенности или вероятности,

выбирается тип ограничений — «мягкие». Таким образом, модели оптимизации с неопределенными параметрами представляются детерминированными моделями, которые могут применяться с использованием стандартных методов выполнения оптимизационных расчетов.

Построенная модель оптимизации используется для решения задачи предварительного проектирования ЛА, для чего применяется алгоритм однокритериальной или многокритериальной оптимизации, например, генетический алгоритм, обеспечивающий высокую вычислительную эффективность при значительном числе проектируемых параметров и критериев оптимизации.

После выполнения оптимизационных расчетов требуется анализ полученных результатов, который осуществляется на основе методов, предназначенных для выбора решений. Анализируя полученный Парето-фронт, ЛПР выбирает предпочтительную точку (вектор в пространстве целевых функций) и соответствующее Парето-решение (вектор проектируемых параметров). В значительном числе многокритериальных задач множество Парето оказывается довольно большим, и выбор в его пределах может быть затруднительным для ЛПР. По этой причине возникает проблема сужения множества Парето. Сужение множества Парето возможно только при наличии дополнительной информации о предпочтениях ЛПР. К настоящему времени для решения этой проблемы предложено множество различных подходов (от эвристических до аксиоматических) и интерактивных человеко-машинных процедур [9].

С использованием предложенной методики созданы модели оптимизации и программные средства для решения некоторых задач предварительного проектирования ЛА при наличии входных и проектируемых параметров с эпистемической и алеаторной неопределенностью.

#### Расчет весовых характеристик ЛА в условиях неточности исходных данных

В качестве примера приведем задачу определения весовых характеристик ЛА (весовой сводки), в аналитических выражениях расчета которых содержатся трудно прогнозируемые на этапе предварительного проектирования коэффициенты, например, позволяющие учитывать степень использования комpositных материалов, технологию производства и др. Решение этой задачи является основой для выполнения дальнейших расчетов при проектировании сверхзвуковых ЛА. Результаты расчета весовой сводки ЛА в дальнейшем используются в задачах определения параметров силовой установки, дальности полета ЛА, летно-технических характеристик, обеспечивающих удовлетворение технических требований и т. д.

Основная часть расходов эксплуатации ЛА состоит из затрат на топливо, поэтому при проектировании минимизируют взлетную массу конструкции

ЛА, влияющую на расход топлива. Запас топлива является важной характеристикой, которая определяет дальность полета ЛА. В связи с этим задача весового расчета представлена в виде двухкритериальной модели оптимизации – минимизация взлетной массы и максимизация запаса топлива с ограничением на посадочную массу ЛА, связанную с длиной пробега при посадке.

Для параметров с алеаторной и эпистемической неопределенностью на основании обработки статистических и экспертных данных были получены, соответственно, нормальные функции распределения вероятности и распределения неопределенности. В качестве детерминированных дубликатов выбраны квантили, последнее время получившие распространение в задачах оптимального управления и проектирования ЛА в условиях алеаторной неопределенности [10]. Прикладная значимость моделей с этим критерием обусловлена тем, что они нацелены на принятие оптимальных решений с учетом риска или требований надежности. Квантильный критерий оптимизации позволяет получить решение, обеспечивающее реализацию необходимого значения целевой функции с заданным уровнем надежности (вероятности/уверенности ЛПР).

В результате применения предложенной модели для расчета весовых параметров ЛА получены фронты Парето, представленные на рис. 2.

Верхняя линия является результатом применения модели оптимизации при отсутствии неопределенных и случайных параметров. На приведенных рисунках видно, что Парето-фронты, полученные в результате выполнения оптимизационных расчетов с увеличением необходимого уровня надежности, смещаются в область худших значений целевых функций. Если требуется высокая надежность решения, то при фиксированном взлетном весе разница по массе топлива может достигать > 4000 кг.

**Выбор оптимальных параметров силовой установки, обеспечивающих удовлетворение требований по дальности сверхзвукового крейсерского полета и приоритетных тактико-технических требований в области дозвуковых скоростей полета в условиях неточности исходных данных**

Максимизация дальности сверхзвукового крейсерского полета (СКП) [11] эквивалентна максимизации  $K/c_e$ , где  $K$  – аэродинамическое качество ЛА,  $c_e$  – коэффициент удельного расхода топлива. Показатель уровня волнового сопротивления  $k_w$  – комплексный параметр, отражающий дозвуковые и сверхзвуковые аэродинамические характеристики ЛА. Практика показывает, что в случае компоновки ЛА с высоким значением  $k_w$  проще обеспечить выполнение дозвуковых тактико-технических требований. Однако при увеличении  $k_w$  уменьшается максимальная дальность сверхзвукового полета. В связи с этим задача параметров силовой установки представлена в виде двухкритериальной

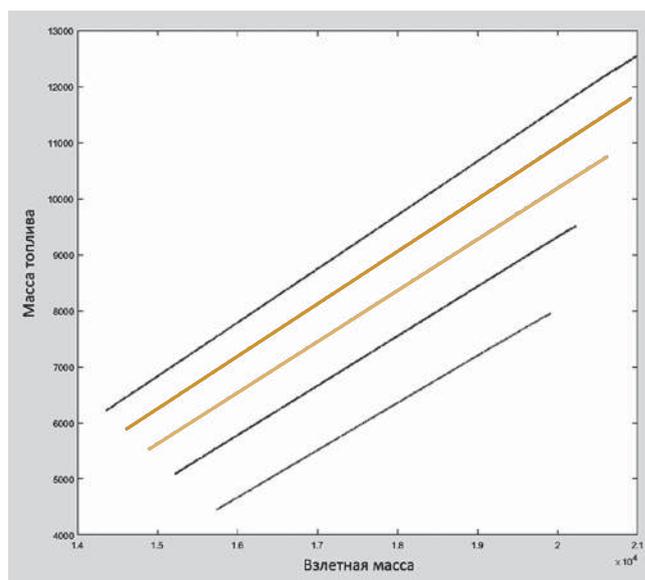


Рис. 2. Парето-фронты для задачи расчета весовых характеристик ЛА в условиях параметрической неопределенности при разных уровнях надежности (вероятности/уверенности ЛПР)

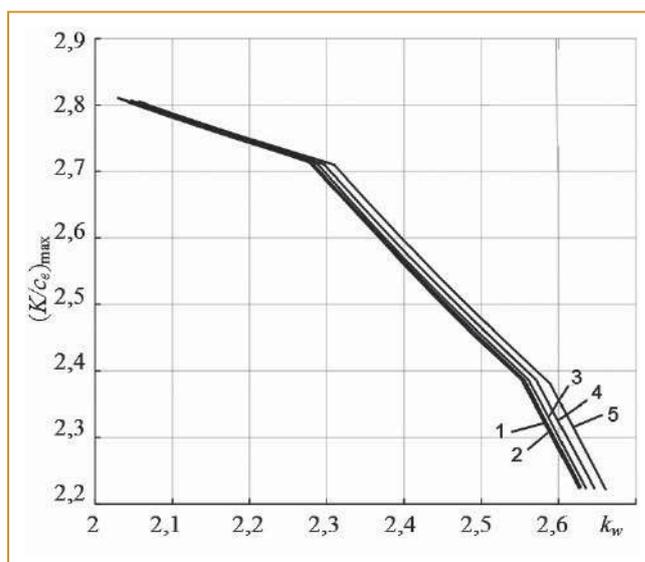


Рис.3. Парето-фронты, полученные на основе модели «оптимизации в среднем» для задачи расчета параметров силовой установки: 1 - 0%; 2 - 5%; 3 - 10%; 4 - 15%; 5 - 20%

модели оптимизации – максимизация  $K/c_e$  и  $k_w$ . Для параметров с эпистемической неопределенностью на основании обработки экспертных данных были получены линейные функции распределения неопределенности. В качестве детерминированных дубликатов выбраны ожидаемые значения («оптимизация в среднем»).

В расчете были взяты параметры геометрии и характеристики двигателя самолета типа F/A-22. Расчеты производились для пяти диапазонов изменения неопределенных параметров с линейной функцией распределения неопределенности: 0, 5, 10, 15 и 20% от заданных номинальных значений. Эта же задача

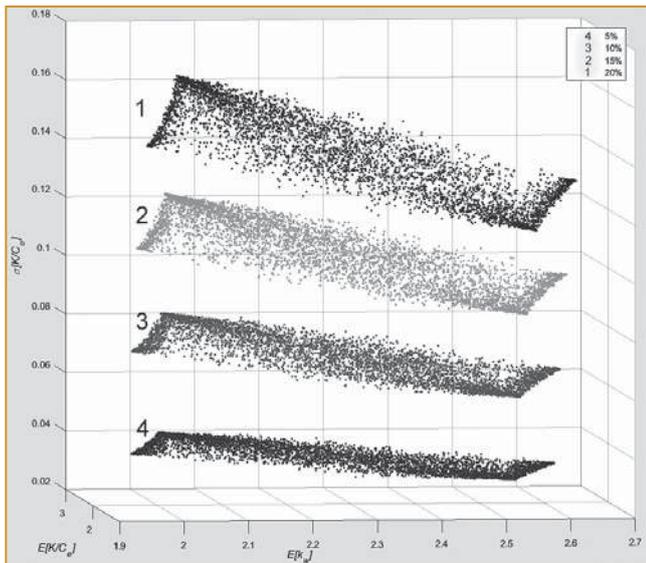


Рис. 4. Трехмерные Парето-фронты, полученные на основе ОРП-модели для задачи расчета параметров силовой установки ЛА

решалась на основе метода Монте-Карло (неопределенные параметры были заменены случайными параметрами с равномерным распределением). В методе Монте-Карло значения неопределенных параметров генерировались в каждом диапазоне  $10^5$  раз. На рис. 3 представлены результаты двухкритериальной оптимизации в виде Парето-фронтов для различных диапазонов изменения неопределенных параметров.

Нижний Парето-фронт соответствует расчету с точными номинальными значениями параметров. Анализ результатов оптимизации показывает, что при расчете с разными диапазонами изменения неопределенных входных параметров Парето-фронты смещаются в сторону лучших для ЛПП значений целевых функций относительно Парето-фронта, рассчитанного при номинальных значениях входных параметров. Парето-фронты, полученные на основе моделей оптимального проектирования при наличии параметров с неопределенностью [7] и метода Монте-Карло, практически совпадают. Максимальная разница значений оптимизируемых параметров для обоих методов расчета равна примерно 0,3%. Как и следовало ожидать, при увеличении диапазона изменения неопределенных параметров увеличивается отклонение от Парето-фронта, полученного при номинальных значениях параметров. Время расчета при применении теории неопределенности на порядок меньше, чем методом Монте-Карло.

Пусть требуемое значение  $L$  (дальность СКП) 1300 км. По формуле Бреге данному значению соответствует  $K/c_e = 2,61$ . По Парето-фронт (рис. 3) соответствующие значения  $k_w$  равны 2,260, 2,265, 2,279, 2,303 и 2,336 для разброса в 0, 5, 10, 15 и 20% соответственно. Полученный результат согласуется со значениями  $k_w$  современных и вновь разрабатываемых маневренных самолетов.

Целевые функции могут оказаться слишком чувствительными к изменениям входных и проектируемых параметров, что при детерминированной оптимизации может привести к значительному изменению характеристик технического объекта или вывести за пределы допустимой области решений. Поэтому во многих случаях целями проектирования ТО в условиях параметрической неопределенности являются обеспечение наименьшей чувствительности целевых функций к возможным изменениям проектируемых и входных параметров, то есть робастности целевых функций.

Для расчета параметров силовой установки маневренного самолета, обеспечивающих удовлетворение требования по дальности СКП и приоритетных ТТ в дозвуковой области полета, используются модели оптимального робастного проектирования (ОРП) при наличии параметров с неопределенностью, разработанные в [8]:  $\max (E [K/c_e], E [k_w]), \min (\sigma [k_w])$ , где  $\sigma [k_w]$  – среднеквадратическое отклонение.

В результате применения данных моделей формируются трехмерные Парето-фронты, которые могут быть представлены в графическом виде (рис. 4).

Результатом применения представленных многокритериальных моделей оптимизации является Парето-множество решений, которое позволяет найти компромисс между необходимыми ожидаемыми значениями целевых функций и робастностью полученных решений.

Проведенные исследования показывают, что использование предложенных моделей для обеспечения робастности целевых функций при разработке ТО обычно имеет следующие особенности:

- с увеличением диапазона неопределенности входных параметров Парето-фронты смещаются в сторону менее робастных решений;
- при заданном диапазоне неопределенности входных параметров увеличение робастности приводит к ухудшению целевых критериев;
- обеспечение определенного уровня робастности приводит к более пессимистическим решениям по отношению к решениям, полученным без учета робастности.

### Заключение

Разработаны и реализованы методика и программные средства для решения задач предварительного проектирования летательных аппаратов при наличии параметров с эпистемической и алеаторной неопределенностью. Использование описанных в статье разработок при принятии проектных решений позволит избежать значительных ошибок и предоставить большие возможности разработчику ЛА, чем наиболее известные в этой области программные средства APP.6 (ALR Швейцария) и др.

### Список литературы

1. Zimmerman H-J. Fuzzy set theory // Inc.WIREs Comp Stat. John Wiley&Sons, 2010, Vol. 2, pp. 317-332.
2. Liu B. Uncertainty Theory: A Branch of Mathematics for Modeling Human Uncertainty, Springer-Verlag, Berlin. 2010.

3. *Rong L. Two New Uncertainty Programming Models of Inventory with Uncertain Costs // Journal of Information & Computational Science, Vol. 8, №. 2, 2011, pp. 280-288.*
4. *Bhattacharyya R., Chatterjee A., Kar S. Uncertainty Theory Based Novel Multi-Objective Optimization Technique Using Embedding Theorem with Application to R & D Project Portfolio Selection // Applied Mathematics, Vol.1, 2010, pp. 189-199.*
5. *Zhou J., Li Z., Wang K. A Multi-Objective Model for Fire Station Location under Uncertainty, Advances in Information Sciences and Service Sciences, Vol.5, №.7, pp. 1184-1191, 2013.*
6. *Ding S. A New Uncertain Programming Model for Grain Supply Chain Design // An International Interdisciplinary Journal, Vol. 16, № 2(A). 2013. pp. 1069-1076.*
7. *Вересников Г.С., Огородников О.В., Панкова Л.А., Пронина В.А. Решение задач предварительного проектирования в условиях параметрической неопределенности // Проблемы управления. 2017. № 4. с. 65-73.*
8. *Veresnikov G.S., Pronina V.A., Pankova L.A., Trakhtengerts E.A. Optimal robust design with uncertain parameters // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017, Moscow). М.: IEEE (Catalog Number: CFP1756H-PRT), Vol. 1, 2017, pp. 152-155.*
9. *Ногин В.Д. Сужение множества Парето: аксиоматический подход. М.: Физматлит. 2015. 236 с.*
10. *Мальшев В.В., Кибзун А.И. Анализ и синтез высокоточного управления летательными аппаратами // М.: Машиностроение. 1987. 302 с.*
11. *Иродов Р.Д., Башкиров И.Г., Колоколова Л.Г. Летно-технические характеристики сверхзвуковых самолетов. В книге: Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов. Под ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Российская академия наук ("Наука" РАН). 2016. с. 579-620.*

*Вересников Георгий Сергеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,  
Панкова Людмила Александровна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,  
Пронина Валерия Александровна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник  
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Башкиров Игорь Геннадиевич — д-р техн. наук, начальник отдела Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ).  
Контактный телефон (495) 334-92-49.  
E-mail: veresnikov@mail.ru aerobig@mail.ru*

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

**С.А. Сомотылова, А.Ю. Торгашов (ИАПУ ДВО РАН)**

Рассматривается задача построения модели виртуального анализатора (ВА) для производства метил-трет-бутилового эфира в условиях ограниченного объема обучающей выборки — малой по своему размеру либо выборки, не содержащей данные технологического режима во всем диапазоне изменения качества продукта, что обуславливается нестационарностью объекта управления, высокой сложностью и стоимостью получения дополнительной информации. Для построения модели ВА, обеспечивающей более высокую точность оценки показателя качества выходного продукта, предлагается алгоритм доформирования исходной обучающей выборки с использованием аналитической модели ректификационной колонны процесса производства метил-трет-бутилового эфира в условиях точно неизвестного значения эффективности массопереноса по Мерффи. ВА, разработанный на основе предлагаемого алгоритма, позволяет повысить точность оценки показателя качества выходного продукта до 40 %<sup>1</sup>.

**Ключевые слова:** предсказательное моделирование, виртуальный анализатор, ректификационная колонна, доформированная обучающая выборка.

### Введение

Одной из основных проблем, стоящих перед нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленностью, является повышение качества основных видов нефтепродуктов и экономической эффективности их производства. Достижение данных целей возможно не только путем модернизации самих нефтеперерабатывающих установок, но и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Результаты анализов, получаемые средствами заводских лабораторий, как правило, не обладают необходимой полнотой и оперативностью, так как измерения проводят 1...2 раза в сутки, что вынуждает технологов поддерживать режимы, обеспечивающие боль-

шой запас по качеству продуктов, тем самым повышая расход сырья и энергии. Применение поточных анализаторов существенно повышает оперативность контроля состояния материальных потоков, однако они имеют высокую стоимость и требуют постоянной калибровки.

Решение указанной проблемы возможно при использовании моделей виртуальных анализаторов (ВА), которые позволяют оперативно отслеживать изменение качества продуктовых потоков. Внедрение ВА обеспечивает оперативное управление качеством выходных продуктов с минимальными энергозатратами и потерями. ВА могут быть интегрированы в состав систем усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУ ТП).

<sup>1</sup> Работа осуществлялась при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-07-00235 А).