

# ВАКУУМНАЯ, КОМПРЕССОРНАЯ ТЕХНИКА И ПНЕВМОСИСТЕМЫ

УДК 621.51

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАСОСОВ

**К.Е. Демихов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: ked@bmstu.ru

*При проектировании современных турбомолекулярных вакуумных насосов одним из важных требований является оптимизация основных параметров и характеристик. Одной из проблем, возникающих при этом, является выбор соответствующих критериев оптимальности и управляемых параметров. Отдавая должное известным общим требованиям, предъявляемым к ним, необходимо учитывать конкретные условия и особенности проектируемых турбомолекулярных вакуумных насосов. Рассмотрены различные варианты критериев оптимальности, приведены расчетные данные по эффективности их использования при различных постановках задачи на разработку насосов, даны соответствующие рекомендации на основании оценки их влияния на основные параметры и характеристики насосов. Выделено одно из наиболее перспективных направлений дальнейшего развития современных турбомолекулярных вакуумных насосов.*

**Ключевые слова:** высоковакуумные механические насосы, критерии оптимальности, управляемые параметры, рабочие колеса, проточная часть.

## BASIC PRINCIPLES OF SELECTING OPTIMALITY CRITERIA IN DESIGNING HIGH-VACUUM MECHANICAL PUMPS

**K.E. Demikhov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: ked@bmstu.ru

*In designing modern turbo-molecular vacuum pumps an important requirement is the optimization of the main parameters and characteristics. One of the problems arising in this case is the selection of appropriate optimality criteria and controlled parameters. Appreciating the known general requirements to them, it is necessary to take into account the specific conditions and characteristics of the designed turbo-molecular vacuum pumps. There are alternative optimality criteria considered in the article. The calculated data on the effectiveness of their usage in different formulations of the problem for the development of the pumps are presented. The recommendations based on evaluation of their impact on the basic parameters and characteristics of the pump are given. One of the most promising areas for further development of modern turbo-molecular vacuum pumps is specified.*

**Keywords:** high-vacuum mechanical pumps, optimality criteria, controlled parameters, impellers, flow part.

В современных условиях развития экономики разработка любого нового вида техники требует решения целого ряда проблем, связанных

с обеспечением более высоких, чем у возможных аналогов, характеристик и параметров, необходимых технико-экономических показателей; использованием современных конструкторских и технологических подходов, закладываемых в разрабатываемый объект возможность перспективного дальнейшего развития. Одной из таких проблем является поиск оптимальных решений в процессе разработки.

Широкое распространение в настоящее время получили известные теоретические положения и методы оптимизации, используемые в практике создания современных технических объектов [1–4]. При этом эффективность их применения в значительной степени зависит от наличия и уровня развитости теоретических основ и методов расчета самих объектов оптимизации.

В среде высоковакуумной техники этому условию отвечают в должной мере турбомолекулярные и молекулярные вакуумные насосы (ТМН и МВН). Разработана и апробирована теория рабочих процессов, методы расчета основных параметров и характеристик, проведены обширные исследования влияния различных факторов на эффективность работы этих высоковакуумных механических насосов (ВМН). Все это является весомым залогом в решении задачи разработки ВМН с оптимальными параметрами и характеристиками. Отсутствие такой базы в лучшем случае может привести к простому выбору наиболее приемлемого решения из ограниченного числа вариантов, что имеет мало общего с классической постановкой задачи оптимизации рассматриваемого объекта. Одной из определяющих позиций такой постановки является выбор концептуального направления самого решения и цели, которую необходимо достичь.

Высоковакуумные механические насосы относятся к категории достаточно сложных конструкций, создание и эксплуатация которых требует серьезных трудозатрат. Поэтому здесь важно уделить внимание проблеме повышения экономичности процесса разработки на всех ее этапах.

На этой методологической концепции основаны созданные в МГТУ им. Н.Э. Баумана известные алгоритмы, методы и программы расчетов оптимальных параметров турбомолекулярных и молекулярных вакуумных насосов [5, 6]. При этом обеспечивается требуемое качество проработки и соответствующая точность их основных параметров и характеристик.

Конечно, такая концепция не может быть единственной, так как в конкретных технических заданиях на разработку ВМН могут быть отражены специальные условия, которые предполагают соответствующие подходы к выбору направлений решения оптимизационных задач.

В общем случае при разработке ВМН возможны следующие варианты задач [5]:

- создание нового ВМН с оптимальными параметрами и характеристиками для требуемых условий эксплуатации;
- разработка ВМН при наличии достаточно жестких ограничений оптимизированных параметров или характеристик;
- оптимизация характеристик насоса для измененных условий их эксплуатации.

При этом решение каждой из этих задач, включая оптимизацию по соответствующим критериям, характеризуется рядом особенностей, которые влияют на выбор наиболее приемлемого метода оптимизации.

Известны и апробированы на практике различные методы оптимизации технических объектов [1, 2, 7]. Поэтому при разработке насоса необходимо выбрать наиболее приемлемый вариант, исходя из условий технического задания. При этом можно отметить следующие возможные подзадачи оптимизации:

- выбор и описание целевой функции с выделением отличительных для рассматриваемой проблемы признаков;
- уточнение области расположения глобального экстремума;
- определение экстремума в результате исследования найденной области методами локальной оптимизации.

Следует отметить, что наиболее сложна и ответственна первая подзадача, поскольку именно она определяет направление и объем поиска оптимального решения. К сожалению, здесь нет общих теоретических методов формализации решения данной подзадачи, на практике приходится рассчитывать на знания и опыт разработчика, существующие рекомендации и субъективные факторы, определяющие специфику разрабатываемого ВМН.

Другой проблемой может стать безусловная необходимость введения целого ряда ограничений на управляемые параметры при оптимизации насосов, как по объективным причинам, исходя из сути рабочих процессов, протекающих в проточной части разрабатываемого насоса, так и по субъективным факторам конструктивного и технологического характера. Наличие таких ограничений в достаточной мере усложняет алгоритм поиска оптимального решения и влияет определенным образом на достигаемую точность решения.

Начальным же этапом процесса проектирования технического объекта с оптимизацией его параметров и, пожалуй, важнейшим является поиск и выбор соответствующих критериев оптимальности. При всей очевидности учета конкретных особенностей объекта следует учитывать и общие требования, которые предъявляются к критериям оптимальности [5].

1. Выбранные критерии оптимальности должны обеспечивать при создании насоса все требования и условия, определенные техническим заданием на разработку.

2. Следует не стремиться сознательно к усложнению формы выражения критерия оптимальности, не снижая при этом качество разрабатываемого объекта. Это обстоятельство не исключает, конечно, применения многокритериальной оптимизации, обратив внимание на весомость и взаимосвязь каждого критерия.

3. Критерии оптимальности должны отражать главную особенность разрабатываемого объекта.

4. Желательно, чтобы выбранные критерии оптимальности имели четко выраженный экстремум.

5. Необходимо использовать критерии оптимальности, имеющие непосредственную зависимость от управляемых параметров.

Особое внимание при этом следует обратить на соответствие и значимость выбранных управляемых параметров особенностям конструктивной схемы насоса, совместимость расширенных пределов их изменения в комплексных задачах различного уровня.

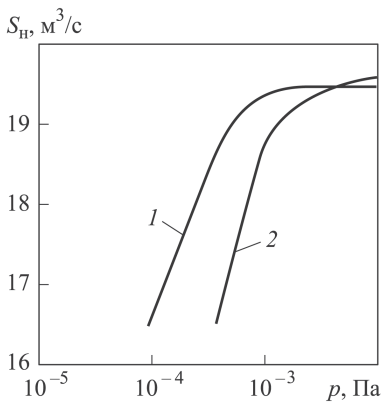
При разработке различных современных технических объектов с оптимальными параметрами или характеристиками используются разнообразными критерии оптимальности [1, 5], предназначенные для решения конкретных задач. В настоящей работе рассматриваются основные аспекты решения оптимизационных проблем при проектировании высоковакуумных механических насосов.

Так, при разработке ТВМ, предназначенных для откачки относительно легких газов (например, водорода или гелия) возникает проблема роста необходимого для обеспечения требуемых откачных параметров числа рабочих колес. Это ведет к повышению габаритных размеров, массы ротора, нагрузки на опоры вала и т.д. Поэтому в таких случаях в качестве критерия оптимальности выбиралось число колес в пакете насоса, что было оправдано, так как приводило к решению поставленной задачи без существенного усложнения процесса разработки ТМН.

В табл. 1 в качестве примера приведены расчетные значения необходимого числа колес проточной части ТМН для обеспечения соответствующих значений давления по водороду на стороне всасывания  $p_{вс}$  и стороне нагнетания  $p_{ф}$ , с использованием лопаточных и дисковых рабочих колес [6]. Быстрота действия насоса по водороду  $S_{н} = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом расчеты проводились как с использованием известной методологии и рекомендаций на проектирование [6], так и по разработанным в МГТУ им. Н.Э. Баумана методам расчета оптимальных параметров проточной части ТМН [5]. Как наиболее полно удовлетворяющие указанным требованиям в качестве управляемых параметров были выбраны [6]: угол наклона лопаток  $\alpha$ , относительная ширина колеса  $a/b$  ( $a$  — абсолютная ширина канала колеса ТМН,  $b$  — протяженность канала), относительная высота канала по радиусу  $\lambda = D_1/D_2$  ( $D_1$  — диаметр корневых сечений лопаток,  $D_2$  — наружный диаметр колеса).

**Число колес в проточной части ТМН с быстротой действия  $S_n = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$**

Давление газа, Па	Тип колес	Число колес	
		при использовании традиционных методов проектирования	при расчете на основе методов оптимизации
$p_{вс} = 2,6 \cdot 10^{-6}$	Дисковые	42	32
$p_{\phi} = 9,3 \cdot 10^{-1}$	Лопаточные	45	33
$p_{вс} = 1,33$	Дисковые	28	24
$p_{\phi} = 46$	Лопаточные	31	26



**Рис. 1. Откачные характеристики насоса ТМН-20Т:**

1 — оптимизированные параметры проточной части; 2 — параметры проточной части, определенные по известным рекомендациям

Как показывает сравнение расчетных данных для выбранных критериев оптимальности и управляемых параметров, использование методов оптимизации позволило существенно снизить число колес в проточной части насоса при одинаковых параметрах откачки.

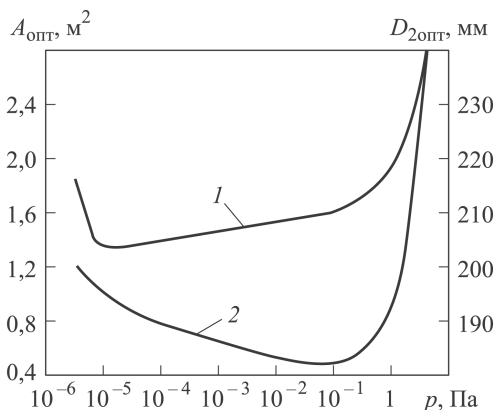
Использование данного критерия оптимальности и отмеченных управляемых параметров позволяет не только снизить требуемое число колес в пакете ТМН, но и улучшить откачную характеристику насоса.

Расчетные откачные характеристики разработанного у нас в стране (и не имеющего по настоящее время аналога в мировой практике) высокопроизводительного насоса ТМН-20Т приведены на рис. 1. Как следует из сравнения полученных данных, откачная характеристика насоса, проточная часть которого рассчитана с использованием разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана методов оптимизации [5], выгодно отличается от откачной характеристики насоса, проточная часть которого определялась с помощью традиционных методов расчета, основанных на использовании ряда ограничительных рекомендаций по выбору основных параметров.

Таким образом, выбор такого критерия оптимальности при проектировании проточной части ТМН может привести к существенному улучшению откачной характеристики насоса, особенно в области малых давлений газа на стороне всасывания.

**Рис. 2. Оптимальные параметры проточной части ТМН с быстрой откачки 0,2 м<sup>3</sup>/с по азоту:**

1 — оптимальные значения наружного диаметра колес  $D_{2\text{опт}}$ ; 2 — оптимальные значения условного объема проточной части  $A_{\text{мин}}$



Оптимизация параметров откачки турбомолекулярного вакуумного насоса при условии, что рабочий диапазон давлений у него достаточно широк, представляет достаточную проблему.

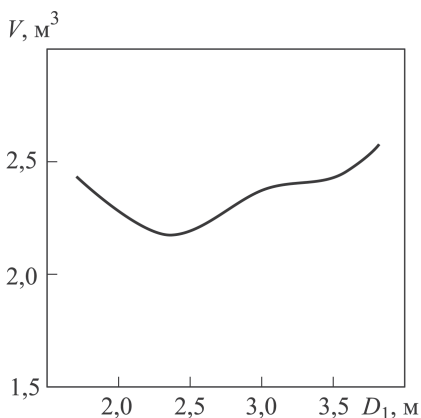
Расчетные данные оптимальных размеров ТМН с быстротой действия 0,2 м<sup>3</sup>/с при откачке азота для различных значений давления газа на стороне всасывания приведены на рис. 2. При этом в качестве критериев оптимальности были выбраны: оптимальные значения наружного диаметра рабочих колес насоса  $D_{2\text{опт}}$  [6] и условного объема проточной части ТМН  $A_{\text{опт}}$ :

$$A_{\text{опт}} = \frac{\pi}{4} D_2^2 N, \quad (1)$$

где  $N$  — число колес в пакете насоса, необходимое для обеспечения требуемого отношения давлений.

Как следует из графиков, оптимальные значения выбранных критериев оптимальности для различных значений создаваемого давления газа на стороне всасывания меняются. Причем минимальный диаметр  $D_{2\text{опт}}$  (при условии обеспечения заданной быстроты откачки  $S_n = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ) достигается при давлении  $p = 10^{-5}$  Па, а минимальное значение условного объема проточной части насоса ( $S_n = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ) имеет место при давлении  $p = 10^{-1}$  Па. Таким образом, результаты оптимизации для различных критериев оптимальности (даже косвенно связанных между собой) могут существенно отличаться. Поэтому в зависимости от поставленных целей при разработке насоса необходимо обосновывать выбор соответствующего критерия оптимальности, так как параметры проектируемого насоса могут существенно отличаться.

К аналогичному выводу можно прийти и при рассмотрении других конструктивных схем турбомолекулярного вакуумного насоса. На рис. 3 приведены расчетные данные определения оптимального значения объема проточной части высокопроизводительного насоса ТМН-20Т с радиальным направлением газового потока (колеса барабанного типа [5]). Как следует из графика, минимальное значение



**Рис. 3.** Определение оптимального объема проточной части высокопроизводительного ТМН-20Т с колесами барабанного типа

оптимального объема проточной части насоса достигается не при минимальном наружном диаметре пакета колес. Это свидетельствует о значимости проблемы выбора соответствующего критерия оптимальности для конкретного случая. Для принятия окончательного решения необходимо выбрать, как, например, в данном случае, что важнее: обеспечить минимальный габаритный размер проточной части ТМН или его объем.

При разработке достаточно сложных объектов возможно применение многокритериальной оптимизации. Однако это в значительной мере усложняет процесс проектирования и требует решения целого комплекса проблем, связанных с необходимостью обеспечения увязки отдельных критериев, согласования ограничений используемых управляемых параметров и т.д.

Проведенные исследования при создании целого ряда ТВН [5] показали практическую целесообразность использования для данных объектов однопараметрической оптимизации с рассмотрением при этом ряда отдельных критериев оптимальности.

В табл. 2 приведены результаты расчетов оптимальных параметров проточной части ТВН с быстротой откачки по водороду  $S_n = 1,5; 3,5; 10 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлениях на стороне всасывания  $p = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ , на стороне нагнетания  $p_\phi = 0,1 \text{ Па}$ .

В качестве вариантов критериев оптимальности были выбраны: число колес в проточной части насосов  $N$ , так как при откачке водорода из-за существенного уменьшения создаваемого отношения давлений возрастает требуемое число рабочих колес для обеспечения заданных характеристик [6]; объем пакета колес насоса  $V$  и масса  $M$  роторных и статорных колес, которые достаточно отражают массогабаритные характеристики насоса. Расчеты проводились для увеличивающихся значений наружного диаметра колеса  $D_2$ , начиная с минимально возможного. Управляемыми параметрами при этом были: угол наклона лопаток  $\alpha$ , относительная ширина рабочих каналов  $a/b$ , относительная длина канала  $\lambda$ .

Как следует из сравнения полученных расчетных данных, оптимальные (минимальные) значения выбранных критериев оптимальности не всегда согласуются между собой. Так, минимальные значения

## Результаты расчетов оптимальных параметров проточной части ТМН

Быстрота откачки $S_n, \text{ м}^3/\text{с}$	Параметры проточной части			
	$D_2, \text{ мм}$	$N_{\min}$	$V, \text{ м}^3$	$M, \text{ кг}$
1,5	0,311	72	0,033	36,4
	0,313	60	0,028	32,7
	0,318	53	0,025	31,3
	0,328	46	0,023	30,8
	0,379	46	0,031	33,9
3,5	0,476	70	0,075	82,3
	0,478	59	0,064	75,3
	0,485	52	0,058	71,6
	0,500	45	0,053	70,4
	0,579	44	0,070	73,4
10,0	0,736	57	0,484	533,4
	0,738	51	0,469	535,3
	0,749	45	0,426	526,5
	0,788	36	0,369	453,5
	0,868	35	0,435	607,7

диаметра колес  $D_{2\min}$  не обеспечивают минимизацию других критериев оптимальности, такой же вывод можно сделать относительно минимального числа колес  $N$ . В рассмотренных вариантах достаточно согласуются результаты по минимизации объема  $V$  и массы  $M$  пакета колес ТМН. Однако это не является правилом.

Таким образом, снова подтверждается тезис о необходимости оценки конкретных требований (предъявляемых к разрабатываемому ТВН) при выборе соответствующего критерия оптимальности.

Проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана исследования ТВН [5] показали, что с использованием традиционных управляемых параметров при решении оптимизационных задач практически исчерпан запас в поиске новых положительных результатов. Поэтому в настоящее время внимание исследователей обращено на разработку и внедрение оригинальных конструктивных схем насосов. И прежде всего на ТМН с комбинированной проточной частью [8].

Анализ полученных расчетных данных по определению оптимальных параметров проточной части ВМН с комбинированной проточной частью показал существенное улучшение характеристик по сравнению с оптимизированными ТМН, имеющие традиционные конструктивные схемы. Это свидетельствует о том, что следующим этапом на пути



дальнейшего развития ТВН является решение проблемы структурной оптимизации насосов в целях радикального повышения эффективности их работы.

**Выводы.** 1. Одной из основных проблем поиска оптимальных решений при разработке современных ТВН является обоснованный выбор наиболее приемлемых для каждого конкретного случая критериев оптимальности. При этом основное внимание уделяется достижению эффективных результатов поиска оптимальных решений.

2. При выборе критериев оптимальности и управляемых параметров необходимо соблюдать их согласованность и взаимодействие в широком диапазоне изменения рабочих характеристик насоса.

3. Одним из перспективных направлений дальнейшего совершенствования ТВН является поиск оптимальных решений с использованием различных конструктивных схем проточной части и выбора наилучшей для заданных условий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеев Н.Н., Иванников Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 336 с.
2. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем М.: Высш. шк., 1980. 311 с.
3. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Машиностроение, 1981. 110 с.
4. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
5. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 255 с.
6. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др. / под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
7. Оптимизация конструкции теплонапряженных деталей дизелей / С.М. Шелков, В.В. Мирошников, Н.А. Иващенко и др. М.: Машиностроение, 1983. 112 с.
8. Демихов К.Е. Современные направления развития высоковакуумных механических насосов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 5 (98). С. 3–11.

## REFERENCES

- [1] Moiseev N.N., Ivannikov Yu.P., Stolyarova E.M. Metody optimizatsii [Optimization Methods]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 336 p.
- [2] Norenkov I.P. Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovanie tekhnicheskikh ustroystv i system [Introduction to Computer-Aided Design of Technological Devices and Systems]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1980. 311 p.
- [3] Sobol' I.M., Statnikov R.B. Vybora optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami [The Choice of Optimal Parameters in Problems with Many Criteria]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 110 p.
- [4] Batishchev D.I. Metody optimal'nogo proektirovaniya [Methods of Optimal Design]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 248 p.

- [5] Demikhov K.E., Nikulin N.K. Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of High-Vacuum Mechanical Pumps]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2010. 255 p.
- [6] Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., Nikulin N.K. Vakuumnaya tekhnika: spravochnik [Vacuum Technology: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p.
- [7] Shelkov S.M., Miroshnikov V.V., Ivashchenko N.A. Optimizatsiya konstruktсии teplonapryazhennykh detaley dizeley [Design Optimization of Diesel Engine Heat-Stressed Parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 112 p.
- [8] Demikhov K.E. Current Trends of High-Vacuum Mechanical Pump. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 5 (98), pp. 3–11 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 31.03.2015

Демихов Константин Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премий Президента РФ и Правительства РФ. Автор более 170 научных работ в области вакуумного машиностроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Demikhov K.E. — D.Sc. (Eng.), Professor of Engineering, Head of the Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University, Honored Scientist of the Russian Federation, winner of the prizes from the President and the government of the Russian Federation, author of over 170 publications in the field of vacuum machinery.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

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

Демихов К.Е. Основные подходы к выбору критериев оптимальности при проектировании высоковакуумных механических насосов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 4. С. 76–85.

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

Demikhov K.E. Basic principles of selecting optimality criteria in designing high-vacuum mechanical pumps. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 4, pp. 76–85.