

ОТЗЫВ

На автореферат диссертации Бутковского Александра Викторовича на тему
«КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В КЛАССИЧЕСКИХ
ЗАДАЧАХ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ», представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. – “Механика жидкости, газа и
плазмы”

Диссертация посвящена исследованию классических течений гидрогазодинамики: плоского и цилиндрических течений Куэтта, течения Рэлея и течения, возникающего при обтекании пластины, расположенной под нулевым углом атаки. Основное внимание уделено переходному и свободномолекулярному режимам. При этом и при исследовании течений в сплошносредном режиме также получен ряд новых результатов.

В классических задачах, поставленных много лет назад, автором найдены некоторые интересные физические эффекты: перемена знака потоков импульса и энергии, резкого изменения потоков импульса и энергии, а также эффект сильного уменьшения влияния одного их параметров на поток импульса (напряжение трения) при переходе от сплошной среды к разреженному газу.

Основным инструментом исследования является метод прямого статистического моделирования. Диссертация состоит из 7 глав. В первых трех главах, исследуются новые эффекты, вызванные изменением степени разреженности газа (числа Кнудсена) в плоском течении Куэтта, течении Рэлея и в течении, возникающем при обтекании пластины под нулевым углом атаки. В четвертой и пятой главах, исследуются эффекты цилиндрических течений Куэтта. Какие-либо кинетические эффекты воздействия на цилиндрические поверхности в течении Куэтта, вызванные их вращением, ранее были неизвестны. В шестой главе найдены и исследованы максимумы потока энергии при фиксированной температуре одной из граничных поверхностей и изменении температуры другой поверхности в задачах о теплопередаче в газе с цилиндрической и сферической симметрией, а также в плоской и продольной цилиндрической задачах Куэтта. В седьмой главе исследована аналогия Рейнольдса

Результаты диссертации весьма интересны, так как проливают дополнительный свет на природу течений разреженного газа. Эффекты, найденные в диссертации в классических течениях, могут иметь место и в других течениях. Научная и практическая ценность полученных результатов состоит в том, что они расширяют существующие представления о природе течений разреженного газа и могут быть использованы в учебном процессе в вузах при подготовке студентов и аспирантов по специальностям «Молекулярная газовая динамика» и «Вакуумная техника».

Высокий уровень, полученных в диссертации результатов подтверждается тем, что ее результаты опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых научных журналах, 10 из которых входят в первый квартиль (Q1) в базах Scopus и Web of Science.

Таким образом, диссертация удовлетворяет требованиям (в том числе п. 9) "Положения о порядке присуждения учёных степеней" от 24.09.2013 №842, предъявляемых к докторским диссертациям, а её автор Бутковский Александр Викторович заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – "Механика жидкости, газа и плазмы".

Я, Титарев Владимир Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации (Бутковского Александра Викторовича), и их дальнейшую обработку.

доктор физико-математических наук

(05.13.18 — "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ"),

главный научный сотрудник Отделения 2 "Моделирование сложных физических и технических систем" ФИЦ ИУ РАН

Наименование организации: Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)

Почтовый адрес организации: 119333, Москва, Вавилова, д.44, кор.2

Телефон: +7 (499) 135-62-60. Адрес электронной почты: frccsc@frccsc.ru

Почтовый адрес Титарева В.А.: 119333, Москва, Вавилова, д.44, кор.2

Телефон: 84991351098. Адрес электронной почты: vladimir.titarev@frccsc.ru

Дата 08.06.2026

В.А. Титарев

Титарев Владимир Александрович



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бутковского Александра Викторовича
«Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах
гидрогазодинамики», представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа А.В. Бутковского посвящена исследованию кинетических эффектов в классических задачах динамики разреженного газа и изучению особенностей аналогии Рейнольдса в широком диапазоне режимов течения. Тематика работы является актуальной как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, поскольку процессы переноса в разреженных газах играют важную роль в задачах вакуумной техники, аэрокосмических приложениях, микро- и наноплюидных системах, а также при разработке и верификации новых физических моделей и численных методов.

Работа отличается большим объемом проведенных исследований и охватывает широкий круг задач динамики разреженного газа: плоское и цилиндрические течения Куэтта, течение Рэлея, задачу обтекания пластины разреженным газом, а также задачи теплопередачи с цилиндрической и сферической симметрией. Основным методом исследования является метод прямого статистического моделирования Монте-Карло (DSMC), который является одним из наиболее надежных и апробированных методов решения задач динамики разреженного газа.

К числу наиболее значимых результатов диссертации следует отнести обнаружение и детальное исследование ряда новых кинетических эффектов, связанных с существованием максимумов, минимумов и сменой знака потоков энергии и импульса при изменении определяющих параметров течения. Особый интерес представляют выявленные закономерности поведения потока нормального импульса в переходном режиме течения, исследование условий возникновения экстремумов потоков энергии, а также результаты, посвященные аналогии Рейнольдса в различных задачах динамики разреженного газа.

Важным достоинством работы является систематический характер исследований. Автор не ограничивается установлением факта существования того или иного эффекта, а стремится выявить физические причины его возникновения и проследить проявление аналогичных закономерностей в различных классах течений. Полученные результаты существенно расширяют современные представления о процессах переноса в разреженных газах и могут служить основой для дальнейших теоретических и численных исследований.

Судя по автореферату, результаты диссертации обладают достаточной степенью достоверности. Они получены с использованием современного численного аппарата, согласуются с известными теоретическими результатами и в ряде случаев подтверждаются независимыми исследованиями других авторов.

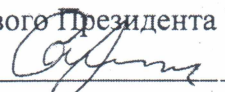
Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах и были представлены на крупных научных конференциях.

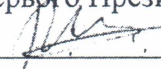
По автореферату имеются следующие замечания.

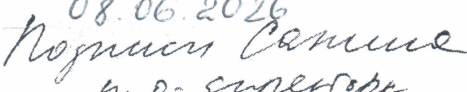
1. Недостаточно подробно обсуждается влияние моделей межмолекулярного взаимодействия и рассеяния газа поверхностью на обнаруженные кинетические эффекты. Представляет интерес вопрос о степени универсальности полученных результатов при использовании различных моделей взаимодействия.
2. Приводится сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными в виде отношения численного результата к экспериментальному F_{rel} для различных наборов управляющих параметров, в частности в главе 3 при различных числах Кнудсена и Маха. Затем автор находит среднее значение $\bar{F}_{rel}$ и даже стандартное отклонение σ . Однако, физический смысл усреднения величины F_{rel} , полученной для различных режимов течения, не вполне ясен и требует дополнительных пояснений.
3. При верификации реализации численного метода получено расхождение до 20 % для потока энергии, передаваемого пластине, при $Kn = 0.026$ по сравнению с результатами работы [79], где используется БГК - модель уравнения Больцмана. Учитывая, DSMC метод это стохастический подход к решению уравнения Больцмана, чем может быть вызвана причина столь заметного расхождения? В частности, в работе [79] отсутствуют табличные данные для указанного значения числа Кнудсена, поэтому остается неясным, проводилось ли сравнение с использованием графической аппроксимации результатов.
4. Практически отсутствует обсуждение вычислительной погрешности результатов DSMC расчетов. Однако утверждается, что точность результатов определялась величиной статистических флуктуаций и, как правило, не превышала 1-2%. Представляется полезным привести более подробную информацию о способе оценки вычислительной погрешности и ее влиянии на определение экстремумов исследуемых зависимостей.

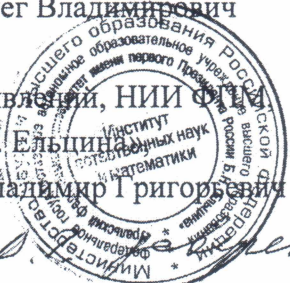
Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки выполненной работы. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Бутковского Александра Викторовича «Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах гидрогазодинамики» является завершенным научным исследованием, содержащим новые результаты, имеющие существенное значение для развития механики жидкости, газа и плазмы.

Считаем, что представленная диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Бутковский Александр Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Заведующий отделом теплофизики и поверхностных явлений, НИИ ФПМ, ИЕНиМ, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кандидат физико-математических наук  Сажин Олег Владимирович

Главный научный сотрудник отдела теплофизики и поверхностных явлений, НИИ ФПМ, ИЕНиМ, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктор физико-математических наук  Черняк Владимир Григорьевич

08.06.2026
 Сажин О.В.,
 и. о. секретаря  Черняк В.Г.



ОТЗЫВ

На автореферат диссертационной работы

Бутковского Александра Викторовича

«КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В КЛАССИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ»,

представленной к защите в диссертационный совет 31.1.006.01 на базе ФГУП «ЦАГИ» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

1. Актуальность и практическая значимость диссертации.

Диссертационная работа Бутковского А.В. представляет собой научное исследование, посвященное анализу физических эффектов, возникающих в неравновесных течениях разреженного газа, при числах Кнудсена в переходном режиме между сплошной средой и свободномолекулярным потоком. Такой анализ, необходимый как для модернизации вакуумной и авиационно-космической техники, так и для создания новых нанотехнологий, производится методом прямого статистического моделирования.

2. Характеристика содержания, научная новизна и апробация работы.

В диссертации изучаются такие виды течений разреженного газа, как плоские и цилиндрические течения Куэтта, течение Рэлея, обтекание пластины, и течения с цилиндрической и сферической симметрией. В этих задачах выявлено наличие экстремумов потоков энергии и передаваемого обтекаемой поверхностью нормального импульса, а также напряжения трения, — как при изменении числа Кнудсена, так и в зависимости от других физических параметров — числа Прандтля, температуры поверхности, угловой скорости цилиндров (для течения Куэтта) и др. Все эти эффекты обнаружены впервые, что было подтверждено как в принятых с большим интересом докладах на ряде международных конференций, так и в публикациях в авторитетных научных изданиях. Результаты работы не только расширяют существующие представления о процессах тепломассопереноса в разреженных газах, но и стимулируют дальнейшие теоретические исследования этих явлений.

3. Достоверность результатов работы обеспечивается подтвержденной на практике эффективностью применяемого метода прямого статистического моделирования, и согласием с результатами, полученными другими авторами иными методами, включая экспериментальные методы.

4. Замечания по содержанию автореферата диссертации.

1. В автореферате очень мало внимания уделено используемым моделям взаимодействия молекул газа между собой и с поверхностью. Судя по описанию содержания первой главы, для столкновений молекул газа между собой применялись модели либо максвелловских молекул, либо твердых сфер. О моделях отражения от поверхности в автореферате не упоминается, хотя в свободномолекулярных (и близких к ним) потоках законы взаимодействия молекул газа с поверхностью оказывают очень большое влияние на характеристики потока. Желательно указать, какие модели отражения применялись, и как полученные результаты от них зависят. Кроме того, автор, по-видимому, не рассматривал такие факторы, как шероховатость поверхности и адсорбция молекул газа, о чем в автореферате также не говорится.

2. В работе получено множество очень интересных численных результатов, но нет примеров их применения в конкретных физических или технических ситуациях. Желательно было бы рассмотреть больше прикладных задач, в которых выявленные эффекты дали практическую пользу.

Указанные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы и полученных в ней результатов.

5. Общее заключение.

Автореферат диссертации дает полное представление о диссертационной работе. Диссертация Бутковского А.В. «Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах гидрогазодинамики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне, и посвященную актуальной научной проблеме. Достоверность результатов работы не вызывает сомнений, сами результаты достаточно полно опубликованы и апробированы. По своему содержанию диссертация соответствует специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Таким образом, диссертация удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Бутковский А.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Профессор кафедры высшей математики
Санкт-Петербургского Политехнического
Университета Петра Великого
доктор физико-математических наук



Халидов
Искандер Анасович
halidov_ia@spbstu.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ)

ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251

+ 7 (812) 591-66-96 (Центр научной аттестации)

ods@spbstu.ru

+ 7 (812) 552-67-50 (Кафедра высшей математики)

hmath@spbstu.ru



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации

Бутковского Александра Викторовича

по теме:

«КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В КЛАССИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ»,

представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Автореферат диссертации Бутковского Александра Викторовича посвящен теоретическому исследованию разреженных течений в рамках “классических” постановок: плоского течения Куэтта, цилиндрического течения Куэтта с неподвижным внутренним цилиндром, цилиндрического течения Куэтта с неподвижным внешним цилиндром, течения Рэлея и течению, возникающему при обтекании пластины, расположенной под нулевым углом атаки.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что изучение процессов тепломассопереноса в разреженном газе необходимо для совершенствования вакуумной и авиационно-космической техники, создания новых нанотехнологий.

В диссертации исследуются зависимости потоков импульсов и энергии, передаваемых поверхностям, ограничивающим течения от различных параметров этих течений. Основным методом исследования является метод прямого статистического моделирования. Аналитические методы используются в диссертации, как правило, для исследования свободномолекулярного режима. Достоверность результатов гарантируется выполнением законов сохранения энергии и импульса и согласием с результатами, полученными другими авторами другими методами, в том числе экспериментально.

Автором найдено более 20 эффектов, связанных с указанными зависимостями потоков импульсов и энергии. Это в основном эффекты немонотонности и эффекты перемены знака. Большая часть эффектов — эффекты переходного режима. Автор исследует эффекты, вызванные изменением, чисел Кнудсена, Маха, Прандтля, температур поверхностей, а также скоростей вращения цилиндров (при исследовании цилиндрических течений Куэтта).

Наиболее интересными эффектами, представляются

- 1) Эффекты перемены знака потока энергии, передаваемой пластине.
- 2) Эффекты максимума потока энергии, отдаваемой пластиной с более высокой температурой.
- 3) Эффекты экстремумов потока нормального импульса, передаваемого пластине, расположенной под нулевым углом атаки при дозвуковом и транзвуковом обтекании.

- 4) Эффекты максимума потоков тангенциального и нормального импульса и потока энергии, передаваемых цилиндрам в течении Куэтта с вращающимся внешним цилиндром.
- 5) Эффект очень резкого перехода от слаборазреженного течения вблизи внутреннего цилиндра к свободномолекулярному при очень малых K_n и больших скоростях внешнего цилиндра.
- 6) Эффект минимума потока нормального импульса, передаваемого внутреннему цилиндру в переходном режиме течения Куэтта с вращающимся внутренним цилиндром.
- 7) Эффекты максимума (по числу Прандтля) коэффициента аналогии Рейнольдса для пластины в течении Рэлея и для пластины, расположенной под нулевым углом атаки, при наличии ламинарного несжимаемого пограничного слоя.

Автор не только описывает найденные эффекты, но и находит физические причины их возникновения. Полученные в диссертации результаты, проясняют особенности течений разреженного газа и представляют несомненный интерес. На их основе можно сделать вывод, что в силу характера взаимодействия потока падающих молекул с отраженными в рассмотренных течениях, эффекты, вызванные изменением степени разреженности в плоском течении Куэтта, течении Рэлея и при обтекании пластины, могут иметь место и в других течениях разреженного газа.

Практическая ценность работы связана с возможностью использования полученных результатов:

- в теоретических и экспериментальных исследованиях в различных областях молекулярной газовой динамики
- в вакуумной технике
- в учебном процессе в вузах при подготовке студентов и аспирантов по специальности «Молекулярная газовая динамика» и «Вакуумная техника».

О высоком научном уровне диссертации говорит тот факт, что ее основные результаты опубликованы в 20 рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Из них 10 входят в первый квартиль (Q1) в базах Scopus и Web of Science.

По автореферату имеются следующие замечания:

- 1) В описании первой главы говорится об «исследовании сильно неравновесного течения однокомпонентного газа». Однако ничего не говорится о наличии внутренних степеней свободы молекул. Это часть предложения, судя по используемым молекулярным моделям должна выглядеть так: «исследование сильно неравновесного течения однокомпонентного одноатомного газа». Здесь и при описании следующих глав диссертации также стоило бы упомянуть какие граничные условия ставились на поверхности пластинок. При чтении

автореферата создается впечатление, что речь идет о диффузном отражении от границ, но чтобы точно убедиться, что отражение от поверхностей диффузное приходится заглядывать в саму диссертацию.

2) Из прочтения автореферата не ясно какие программные средства использовались для расчета течения Куэтта и других задач. Соответствующий комментарий сделан только при описании третьей главы, посвященной задаче Рэлея: "Эти и последующие расчеты течения Рэлея проводились с использованием программы Г. Берда."

Указанные замечания не снижают общей научной ценности работы и не влияют на общую положительную оценку работы. Исходя из представленных в реферате сведений можно сделать вывод, что диссертация Бутковского А.В. "Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах гидрогазодинамики" выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени.

Я, Быков Николай Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации (Бутковского Александра Викторовича), и их дальнейшую обработку.

Доктор физико-математических наук,
(01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор кафедры физики, главный научный сотрудник учебной научно-исследовательской лаборатории "Вычислительная механика" ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого

Наименование организации: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

Почтовый адрес организации: ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251

Телефон 8(800)707-18-99. Адрес электронной почты: office@spbstu.ru.

Почтовый адрес Быкова Н.Ю.: 190068, СПб, ул. Декабристов 14, кв.53.

Телефон: +7-921-9502546.

Адрес электронной почты: nbykov2006@yandex.ru

20.05.2026

Быков Николай Юрьевич



Подпись д.ф.-м.н. Быкова Н.Ю. заверяю

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ООО «Софт-Импакт»
В.В. Калаев



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бутковского Александра Викторовича
«КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В
КЛАССИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук.

Предметом диссертационной работы является исследование влияния параметров течения на силовое и тепловое воздействия на поверхности, ограничивающие рассматриваемые течения разреженного газа: на поток энергии, передаваемой поверхностям, напряжение трения, поток нормального импульса и на их соотношения. Изучены плоские и цилиндрические течения Куэтта, течение Рэлея и обтекание пластины под нулевым углом атаки. Результаты таких исследований имеют важное значение для развития, прежде всего, вакуумных и авиационно-космических технологий и нанотехнологий. Это говорит об актуальности полученных результатов.

Результаты проведенного в диссертации исследования соответствуют паспорту специальности.

Выполненный А.В. Бутковским подробный анализ влияния чисел Кнудсена на передаваемые пластине нормальный импульс и энергию, позволил выявить немонотонную зависимость этих величин от числа Кнудсена. В случае нестационарного рэлеевского течения немонотонность возникает как функция времени.

Интересным результатом является обнаруженное сильное уменьшение влияния температуры пластины на напряжение трения на пластине в переходном режиме при дозвуковых и умеренных сверхзвуковых числах Маха.

Важнейшим результатом диссертационной работы являются выводы исследования о поведении напряжений трения и потоков энергии, передаваемых цилиндрам, в задаче о соосных цилиндрах. Обнаруженный переход от слаборазреженного течения вблизи внутреннего цилиндра к сильно разреженному вблизи внутреннего цилиндра при увеличении скорости вращения внешнего цилиндра и влияние его на напряжение трения и поток энергии скоро станет хрестоматийным эффектом.

Интерес также представляют результаты сопоставления зависимостей величин нормального импульса, передаваемого пластине и внутреннему

цилиндру при сравнении течений между пластинами и между соосными цилиндрами.

Безусловно интересны результаты, связанные с зависимостью теплопередачи между соосными цилиндрами в зависимости от числа Кнудсена, полученные как численно (DSMC), так и аналитически.

По содержанию автореферата имеются следующие замечания:

1. Из текста автореферата не ясно к какому диапазону значений показателя адиабаты относятся выводы диссертационной работы.
2. В тексте автореферата имеется ряд неточностей. Например, в п. 5 положений, выносимые на защиту, где речь идет о течении Куэтта с неподвижным внешним цилиндром, утверждается, что «Абсолютная величина потока нормального импульса, передаваемого внутреннему цилиндру, имеет в переходном режиме минимум как функция скорости внешнего цилиндра»

Замечания не снижают общую положительную оценку работы.

Полученные соискателем результаты имеют несомненную научную, практическую и методическую ценность. Они широко представлены в литературе, неоднократно обсуждались на конференциях и хорошо известны специалистам. Считаю, что А.В. Бутковский безусловно заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Горбачев Юрий Евгеньевич

д.ф.-м.н., с.н.с.

Ведущий специалист ООО «Софт-Импакт»

194 044 С.-Петербург, Выборгская набережная, 49, оф. 603, т. 812 643 4187

Подпись руки Горбачева Юрия Евгеньевича
заверяю. 28.05.2006г. *Александр Филиппович*
директор ООО «Софт-Импакт»

