

«Утверждаю»

Директор



Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

А.И. Аптекарев

февраля 2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Березуна Даниила Андреевича на тему «Трассирующая нормализация», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

### Практическая значимость и актуальность работы

Диссертационная работа Березуна Даниила Андреевича посвящена вопросам, связанным с нормализацией термов в нетипизированном лямбда-исчислении.

На первый взгляд, может показаться, что речь идет о какой-то экзотической области исследования, не связанной с реальными проблемами, возникающими при разработке и реализации математического и программного обеспечения. Однако, это впечатление является глубоко ошибочным! Ибо лямбда-исчисление является упрощенной моделью реальных языков программирования. А упрощение делается для того, чтобы можно было сосредоточиться на изучении самых сложных и глубоких проблем, касающихся синтаксиса и семантики языков программирования, не отвлекаясь и не тратя силы на второстепенные детали.

В частности, лямбда-исчисление позволяет породить в процессе вычислений новые функции, передавать функции в качестве параметров, и выдавать функции в качестве результатов функций. Такое вольное обращение с функциями допускается далеко не во всех практических языках программирования из-за сложностей, возникающих при реализации возможностей такого рода.

При этом, важно отметить, что бестиповое лямбда-исчисление обладает алгоритмической полнотой по Тьюрингу, и это означает, что на языке лямбда-исчисления (несмотря на его кажущуюся простоту) может быть записан любой алгоритм.

Таким образом, результаты, полученные в диссертации, могут найти применение при создании программного инструментария для работы с практическими языками программирования.

Одной из ярких особенностей лямбда-исчисления является то, что операционная семантика лямбда-термов определяется в терминах «нормализации», которая заключается в приведении заданного лямбда-терма к нормальной форме в результате выполнения над ним некоторой последовательности преобразований. В терминах, привычных для программистов, это означает, что в процессе исполнения программы, программа изменяет саму себя!

С другой стороны, в большинстве других алгоритмических языков изменение программы в процессе её исполнения не допускается. Это верно как в отношении «теоретических» языков (таких как алгоритмы Маркова или машина Тьюринга), так и практических (таких, как Фортран).

Это связано с тем, что неизменяемость программы значительно облегчает создание интерпретаторов, компиляторов, оптимизаторов и верификаторов для языков, обладающих таким свойством. Образно говоря, работа с неизменяемой программой - это «стрельба по неподвижной мишени», в то время как работа с изменяющейся программой - это «стрельба по движущейся мишени».

Однако, возникает вопрос: а нельзя ли реорганизовать процесс нормализации лямбда-термов таким образом, чтобы исходный терм в процессе нормализации оставался неизменным? И именно эта проблема и рассматривается в диссертации применительно к языку нетипизированного лямбда-исчисления!

И очевидно, что положительное решение этой проблемы может привести к устранению многих затруднений, возникающих в процессе создания реализаций для языков программирования, в которых допускается изменение программы во время её исполнения.

Поэтому актуальность и практическая значимость диссертационной работы Березуна Д.А. не вызывает сомнений.

## **Основные научные результаты**

Диссертация Березуна Д.А. состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, определяются цели и задачи работы.

В **первой главе** проведен анализ предшествующих работ в области нормализации термов лямбда-исчисления. Особое внимание уделяется методу трассирующей нормализации, которая основана на разбиении процесса нормализации на два этапа: (1) обход исходного терма, результатом которого является построение трассы обхода и (2) построение нормальной формы исходного терма на основе анализа трассы.

На основе анализа предшествующих работ делается вывод, что описанные

алгоритмы трассирующей нормализации применимы к простому типизированному лямбда-исчислению (которое не является алгоритмически полным по Тьюрингу). Но эти алгоритмы нельзя применить напрямую к нетипизированному лямбда-исчислению. Поэтому ставятся следующие вопросы. Насколько существенна информация о типах и можно ли без этой информации обойтись? Какие изменения требуется внести в существующие алгоритмы трассирующей нормализации, чтобы их можно было применить к нетипизированному лямбда-исчислению.

Ответы на эти вопросы даются в следующих главах диссертации.

Во **второй главе** рассматриваются вопросы, связанные с понятием головной линейной редукции. В частности, автором предлагается формальное определение полной головной линейной редукции и исследуется его связь с (известным из предшествующих работ) понятием линейной редукции.

Среди прочего, доказывается, что (1) если полная головная линейная редукция завершается, то её результат находится в нормальной форме и (2) полная головная линейная редукция завершается тогда и только тогда, когда завершается головная редукция.

В **третьей главе** описан новый, предложенный автором, алгоритм трассирующей нормализации, который выполняет работу по построению нормализованного терма за два шага. На первом шаге происходит обход исходного терма (без внесения в него изменений) и генерируется трасса обхода терма. На втором шаге, на основе анализа трассы происходит построение нормализованного терма.

Предложенный алгоритм не использует информацию о типах и, таким образом, в отличие от ранее известных алгоритмов, применим к термам нетипизированного лямбда-исчисления. Разумеется, при этом он остается применим и к термам простого типизированного лямбда-исчисления, поскольку при таком применении достаточно просто игнорировать информацию о типах.

Хочется особо отметить мастерство, проявленное автором при изложении этого необычного и сложного для восприятия материала. Ведь он мог бы предъявить новый алгоритм чисто формально, как нечто «свалившееся с неба». Однако, тогда было бы непонятно, откуда взялся этот алгоритм, и как его нужно расширять в случае добавления к чистому лямбда-исчислению каких-то дополнительных конструкций. Но автор избрал другой стиль изложения: он показывает, как этот алгоритм может быть получен из традиционного алгоритма нормализации, основанного на подстановках путем нескольких преобразований этого алгоритма.

Конечным результатом является программа первого порядка с хвостовой рекурсией, которую, при желании, не составляет труда переписать на императивном языке программирования в виде программы с циклами. А это - существенно для некоторых

возможных применений алгоритма.

В **четвертой главе** доказывается корректность предложенного автором алгоритма трассирующей нормализации и устанавливается его связь с полной головной линейной редукцией (предложенной автором во второй главе).

В **пятой главе** рассматривается одно из возможных применений предложенного автором алгоритма трассирующей нормализации. А именно, компиляция термов нетипизированного лямбда исчисления посредством специализации алгоритма нормализации по отношению к терму. Как известно, если имеется интерпретатор какого-то языка, то можно проспециализировать его по отношению к входной программе, получив скомпилированную программу. А проспециализировав сам специализатор по отношению к интерпретатору, можно сгенерировать и компилятор с того языка, программы на котором обрабатывает интерпретатор. Преобразования такого рода известны как «проекции Футамуры».

Если специализатор программ основан на методе частичных вычислений, то специализация интерпретаторов приводит к нетривиальным результатам только в том случае, если интерпретатор удовлетворяет некоторым требованиям. А именно, если интерпретатор не модифицирует входную программу, а только посещает её части, то в процессе специализации интерпретатора появляется возможность разбить множество возможных состояний интерпретатора на конечное число классов, каждый из которых содержит однотипные состояния интерпретатора. Что и делает возможным специализацию специализатора по отношению к интерпретатору с целью превращения интерпретатора в компилятор.

А основным свойством алгоритма трассирующей нормализации, предложенного в диссертации, как раз и является то, что он не модифицирует исходный терм, а только посещает конечное число его подтермов. В силу чего, этот алгоритм легко поддается специализации с помощью хорошо известных частичных вычислителей. Что убедительно и показывается в пятой главе диссертации.

В **шестой главе** диссертации обобщаются некоторые из результатов, полученных в предыдущих главах. Показываются, что предложенные идеи и методы применимы не только к нормальному порядку редукции, но также и к аппликативному порядку, и к стратегии вызова по значению. Это представляется весьма важным с практической точки зрения, поскольку вызов параметров по значению применяется во многих языках программирования, используемых на практике.

Кроме того, в этой главе показано, что при добавлении к чистому лямбда-исчислению дополнительных языковых конструкций, характерных для «практических» языков программирования, не создается каких-то серьезных дополнительных проблем, и алгоритм трассирующей нормализации, предложенный в диссертации, с небольшими

модификациями, применим и к лямбда-термам, содержащим эти дополнительные конструкции.

## **Достоверность основных положений и результатов работы**

Все результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы достаточно полно и хорошо аргументированы.

Диссертация имеет ясную и логичную структуру. Выбор направления исследования основан на тщательном анализе предыдущих работ в области трассирующей нормализации. Это позволило прийти к постановке задачи, которая представляет интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения.

В процессе работы диссертантом были использованы методики и подходы, разработанные предшественниками в области трассирующей нормализации, но также предложены и собственные оригинальные подходы, понятия и алгоритмы. Корректность алгоритмов доказана.

Результаты работ неоднократно докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и семинарах. Основные результаты диссертации опубликованы в 5 научных работах, зарегистрированных в РИНЦ. При этом, две единоличные статьи изданы в журналах из “Перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук”. Две статьи опубликованы в изданиях, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science.

## **Практическая ценность и рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Результаты работы рекомендуются к использованию в Институте программных систем им. А.К.Айламазяна РАН, Московском, Санкт-Петербургском государственных университетах, Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, институте системного программирования РАН и других организациях, и могут найти применение при реализации языков программирования, а также программного инструментария для оптимизации и верификации программ.

## **Замечания**

Диссертация имеет логичную структуру и написана понятным языком.

Однако, в тексте имеются отдельные опечатки и не вполне удачные формулировки.

1. На стр.7 используется выражение «разработать в рамках стратегии вычисления нормального порядка редукции алгоритм трассирующей нормализации».

Получается, будто речь идет о «вычислении порядка редукции». На самом же деле, конечно, имеются в виду «вычисления, применяющие нормальный порядок редукции».

2. На стр. 21 говорится, что «стратегия вычисления по имени сначала вычисляет функцию до значения, лямбда-абстракции, после чего...». Однако, в лямбда-исчислении вычисления происходят не над «функциями», а над лямбда-термами. Поэтому, очевидно, имелось в виду, что нужно выполнить вычисления не над «функцией», а над термом (который, в случае типизированного лямбда-исчисления должен иметь функциональный тип). И, если в результате вычисления получится лямбда-абстракция, её уже можно будет применить к другому терму.
3. На стр. 27, в одном и том же абзаце, термы называются то «спинальными», то «спинными». Не следует употреблять две формы одного и того же термина для обозначения одного и того же понятия.
4. На стр. 76, в заголовке раздела 5.3, используется словосочетание «компиляция нетипизированного лямбда-исчисления». На самом деле, конечно, компиляции подвергается не само исчисление, а лямбда-термы этого исчисления. Правильная формулировка звучала бы как «компиляция термов нетипизированного лямбда-исчисления».
5. На стр. 55 описывается процесс построения нормализованного терма на основе анализа трассы обхода исходного терма, который включает в себя процедуру «очистки» трассы от «лишних» токенов. При этом, процесс «очистки» объясняется на примерах и пояснениях к этим примерам. Однако, в интересах полноты и единообразности стиля изложения, было бы лучше привести формальное описание алгоритма «очистки», позаимствовав его (с точностью до обозначений) из экспериментальной реализации нормализации (на которую есть ссылка в диссертации).

## **Заключение**

Отмеченные недостатки не оказывают существенного влияния на общий уровень и основные результаты диссертации. Диссертационная работа Березуна Д.А. на тему «Трассирующая нормализация» является законченной научно-квалификационной работой, содержит новые научные и практические результаты, связанные с решением актуальной задачи, имеющей большое значение для развития методов разработки и реализации математического и программного обеспечения вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей. Название диссертации соответствует основному содержанию диссертации. Автореферат достаточно полно отражает содержание работы.

Таким образом, диссертационная работа соответствует паспорту специальности

05.13.11, удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 30.07.2014, от 21.04.2016), а сам автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

Работа была заслушана и одобрена, отзыв был рассмотрен и утвержден на семинаре Отдела инструментального и прикладного программного обеспечения ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, протокол № 7 от 26.12.2017 г.

Отзыв подготовил  
кандидат физико-математических наук  
(специальности 01.01.10 — математическое  
обеспечение вычислительных машин и систем),  
ведущий научный сотрудник  
Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

125047, г. Москва, Миусская пл., д.4

Сайт: <http://www.keldysh.ru>

Тел.: +7 499 250-78-73

Эл. почта: [romansa@keldysh.ru](mailto:romansa@keldysh.ru)



Сергей Анатольевич Романенко