

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Зубарева С.Н.
«Расчет производства энтропии некоторых типов звезд на основе BV-фотометрии»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационное исследование С.Н.Зубарева посвящено довольно экзотической для данного диссертационного совета теме – поиску методов расчета производства энтропии для широкого круга звезд, включающих звезды главной последовательности, субгиганты, гиганты и супергиганты. Однако это не первая защищаемая здесь работа данного направления. Возможности приложения теплофизики к решению астрофизических проблем в течение последних лет активно анализируются в УрФУ под руководством В.Д.Селезнева и Л.М.Мартюшева. В этом «прорыве» коллектива из области традиционной молекулярной физики в область звездных макросистем, по мнению оппонента, ярко проявилась универсальность теплофизических методов решения самых разнообразных задач.

Судя по литературному обзору, содержащемуся в первой главе диссертации, расчеты температуры и светимости звездных скоплений активно проводятся астрофизиками в течение последних 20 лет. Однако попытки хотя бы приближенно рассчитать производство энтропии в этих макросистемах ранее не предпринимались. Диссертант предлагает метод его расчета, использующий аппарат нелокальной (прерывной) неравновесной термодинамики, который вполне адекватен решаемой задаче, поскольку использует только упомянутые выше параметры – температуру и светимость объекта. Имея в виду важность производства энтропии как основного параметра, который определяет направление и интенсивность неравновесных процессов, протекающих в звездах, тему работы следует признать весьма *актуальной*.

Литературный обзор основных представлений о звездах и протекающих в них процессах, содержащийся в первом разделе главы 1, написан весьма лаконично и грамотно. К сожалению, в последующих разделах этой главы он становится более рыхлым, а изложение таких общеизвестных вопросов, как, например, соотношения Онзагера, по мнению рецензента, вообще могло бы быть опущено. Обзор не завершается постановкой задач диссертационного исследования, что существенно снижает стройность изложения.

Во второй главе С.Н.Зубарев показывает, каким образом из фотометрических BV-данных астрономических наблюдений можно извлечь значения производства энтропии. Расчеты основаны на рассмотрении упрощенной модели звезды, предложенной

В.Д.Селезневым и условно разделяющей звезду на однородное ядро, зону локального равновесия излучения с веществом и сравнительно тонкую фотосферу, в которой, по представлениям автора модели, и реализуется производство энтропии, связанное с неравновесным взаимодействием излучения с веществом. Для каждой из перечисленных зон в работе С.Н.Зубарева методами неравновесной термодинамики получены выражения для производства энтропии, которые, в отличие от результатов сравнительно недавних расчетов Кеннеди, удовлетворяют уравнению баланса энтропии звезды.

На взгляд человека, тематика исследований которого далека от астрофизических проблем, некоторые допущения, сделанные в этой главе, выглядят не вполне обоснованными. Например, слишком произвольным представляется предположение об отсутствии радиальной конвекции в приповерхностном слое звезды, который вносит основной вклад в производство энтропии (с.55). Мне представляется, что большой перепад температуры здесь связан с большим оттоком энергии от фотосферы, поэтому сводить его расчет к решению уравнения теплопроводности не вполне корректно. Впрочем, судя по приведенным ссылкам, «ответственность» за эти допущения в основном лежит на руководителях диссертанта, которые опубликовали свои первые работы на эту тему еще до начала его диссертационного исследования.

Основная часть личного участия С.Н.Зубарева начинается с главы 3, в которой излагается методика определения теплофизических характеристик звезд по экспериментальным данным астрономических наблюдений. Им впервые предложен алгоритм расчета производства энтропии звезд на основе существующих данных bv -фотометрии. Совместно со своим руководителем диссертант автоматизировал процесс обработки результатов фотометрии для звезд рассеянных и шаровых скоплений, а затем самостоятельно разработал программы для расчета теплофизических параметров звезд на основе опытных данных с теоретическими выборками звездных скоплений, их возрастов и металличностей, а также для определения массы и других параметров звездного скопления с использованием модельных данных их теоретической изохроны. Качество и оригинальность разработанных программных комплексов подтверждены Свидетельствами об их государственной регистрации. Имея в виду важность перечисленных расчетов для современной астрофизики, можно заключить, что только за создание этих комплексов диссертант мог бы быть удостоен искомой степени.

Очень грамотно и тщательно диссертант выполнил тестирование программ и оценку ошибок расчетов с опорой на эталонные величины. Он сравнивает несколько имеющихся калибровок и выбирает наиболее точные с учетом достоверности каждой из них для различных объектов. Опираясь на точность их определения, он получает вполне резонную

оценку точности расчетов производства энтропии (около 3%) и удельного производства энтропии (12%). Все это позволяет считать результаты последующих расчетов *достоверными*, а сделанные при их анализе выводы диссертанта *обоснованными*.

Основные результаты проведенных расчетов приводятся в заключительной 4-й главе диссертации. Здесь, базируясь на справочных фотометрических данных, полнота и точность которых удовлетворяет требованиям диссертанта, он рассчитал светимости, эффективные температуры и производства энтропии почти 12000 звезд различных типов. В числе наиболее значимых и вполне *оригинальных* результатов этих расчетов укажем на:

- впервые найденные зависимости производства энтропии от светимости и эффективной температуры для звезд рассмотренных типов;
- впервые обнаруженную близость производства энтропии звезд главной последовательности к значению, свойственному Солнцу, независимо от массы, температуры и светимости звезды;
- вывод об увеличении полного производства энтропии при переходе от суб- к супергигантам, связанном диссертантом с монотонной зависимостью этой величины от массы звезды.

Еще более выразительные результаты дал расчет удельного производства энтропии с единицы объема звезд. Оказалось, что, независимо от возраста звездного скопления, разброс этой характеристики для звезд главной последовательности в 200 раз меньше разброса полного производства энтропии и ее удельного производства на единицу массы. Этот результат выглядит довольно неожиданным, поскольку температура и размеры фотосферы, на которую, согласно рассматриваемой модели звезды, приходится основная часть производства энтропии, для звезд главной последовательности существенно различаются. Полученные результаты приводят к выводу, что огромное количество звезд различной массы при своем образовании достигают состояния с одним и тем же удельным производством энтропии, близким к солнечному. С возрастом звезды интервал его значений для различных звезд главной последовательности уменьшается еще в 35 раз. Это позволяет рассматривать удельное производство энтропии в качестве параметра, характеризующего наиболее устойчивое состояние (аттрактор) при образовании и эволюции звезд. Значимость этого вывода для астрофизики вполне очевидна.

Перечисленные выше результаты диссертационного исследования С.Н.Зубарева, по мнению оппонента, существенно превышают уровень требований к кандидатской диссертации по теплофизике.

Выше были названы мои основные замечания по тексту первых двух глав диссертации. Существенных замечаний по содержанию глав 3 и 4, в которых

сосредоточены основные результаты работы, у меня нет. В числе незначительных замечаний отмечу неудачную фразу на с.41: «...известны случаи, когда использование линейных соотношений Онзагера может оказаться некорректным» (на самом деле это не «случаи», а целая область процессов, изучаемых в теории самоорганизации открытых систем, начиная с работ брюссельской школы. Кроме того, работа грешит стилистическими ошибками даже в той ее части, которая вошла в автореферат и, следовательно, должна бы быть особенно тщательно откорректирована.

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку, которую оппонент дает диссертационной работе С.Н.Зубарева. Ее результаты могут служить основой для дальнейшего исследования эволюции звезд с точки зрения теплофизики. Они значимы при анализе справедливости вариационных принципов неравновесной термодинамики, связанных с производством энтропии, для различных этапов развития звезд.

Диссертационная работа С.Н.Зубарева соответствует паспорту специальности 01.04.14, поскольку он предусматривает «...теоретические и экспериментальные исследования свойств веществ в жидком, твердом и газообразном состоянии при наличии всех видов тепло- и массообмена во всем диапазоне температур и давлений..., а также численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе...». В ней содержится решение задачи, имеющей значение для развития теплофизики звезд и их скоплений. Основные научные результаты диссертации докладывались на 6 российских и 7 международных конференциях. Они опубликованы в 3 зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК, и в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

На основании изложенного выше, считаю, что рецензируемая работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым п.9 Положения о присуждении ученых степеней к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, а ее автор С.Н.Зубарев заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Попель Петр Станиславович,
доктор физико-математических наук,
профессор,
профессор кафедры физики и
математического моделирования
Уральского государственного
педагогического университета,
620017 Россия, Екатеринбург,
пр.Космонавтов, 26
10 мая 2016 г.
e-mail: pspopel@mail.ru,
тел. (343) 218 06 41



Подпись *Л.С. Столица*
Заверяю инсп. ОК УрГПУ

М.М. Кавагонец