

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Косьянчука В.В. на диссертацию Гузей Дмитрия Викторовича “Исследование вынужденной конвекции наножидкостей”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – “Механика жидкости, газа, и плазмы”.

В диссертационной работе Гузей Дмитрия Викторовича проведено систематическое и разностороннее исследование теплогидравлических свойств ряда наножидкостей в различных режимах течения. Отдельно были исследованы случаи течения наножидкости в каналах с внутренними интенсификаторами теплообмена, а также течение магнитной наножидкости в постоянном магнитном поле. Основу работы составляют экспериментальные исследования высокого уровня, дополненные также детальным численным расчетом на основе оригинальной физической модели.

Актуальность работы не вызывает сомнений и продиктована ростом мощностей вычислительных и производственных систем, и связанным с этим ростом тепловыделения, что приводит к необходимости поиска новых, более эффективных систем охлаждения. Одним из наиболее актуальных путей решения проблемы является использование наножидкостей, что подтверждается выходом десятков и даже сотен статей на эту тему в ведущих мировых журналах по тепломассопереносу.

Новизна полученных результатов обусловлена в первую очередь систематичным (рассмотрены десятки различных наножидкостей) и всесторонним (проведены теоретические, экспериментальные и вычислительные исследования) изучением теплогидравлических свойств наножидкостей.

Новые результаты получены в области использования наножидкостей в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена. Экспериментально показано, что наножидкости в прямых каналах дают значения теплогидравлической эффективности сопоставимые с водой в каналах с искусственными интенсификаторами теплообмена. А при использовании наножидкости вместо воды в таких каналах можно дополнительно на 30-40% интенсифицировать теплообмен.

Также оригинальные результаты получены при исследовании магнитных наножидкостей. Для исследования использовалась комбинация PIV-метода, тепловизионной съемки, а также численного моделирования на основе разработанной автором математической модели. Комбинация данных методов позволила детально изучить и объяснить механизмы аномально высокого повышения коэффициента теплоотдачи магнитной наножидкости в магнитном поле.

Достоверность представленных в диссертации результатов обосновывается использованием проверенных измерительных приборов, современных аппаратных и программных средств для обработки данных, сопоставлением и согласованием полученных результатов с известными в литературе данными, использованием физически обоснованных математических моделей и результатами их систематического тестирования и сопоставления с эталонными решениями и экспериментами.

Научная и практическая значимость работы заключается в экспериментальном установлении основных факторов, определяющих теплогидравлическую эффективность наножидкостей в ламинарном и турбулентном режимах течения и в различных геометриях, а также установлении того факта, что магнитные наножидкости могут дополнительно интенсифицировать теплообмен на 40-80% при приложении магнитного поля.

Апробация работы подтверждается 14 публикациями в периодических изданиях, из которых особенно стоит отметить 4 статьи в международном высокорейтинговом журнале “International Journal of Heat and Mass transfer”, занимающем одну из лидирующих позиций в своей области, а также выступлениями на десятках отечественных и международных конференций

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 67 наименований. Общий объем диссертации составляет 161 страницу.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели работы, перечислены положения, выносимые на защиту, научная новизна, кратко описаны методология и методы исследований, приведены сведения об апробации результатов и информация о структуре работы.

В первой главе проведён обзор литературы по тематике работы. Отмечаются основные исследования по данному направлению, в том числе несколько довольно свежих работ. Помимо этого, также отмечается некоторая несогласованность и зачастую даже противоречивость имеющихся в литературе результатов.

Вторая глава детально описывает экспериментальную установку и подход к определению коэффициента теплоотдачи наножидкости, которые будут использоваться в последующих главах, а также описывает физические модели наножидкости, которые будут использоваться при моделировании проведенных экспериментов.

В третьей главе проводится систематическое исследование коэффициента теплоотдачи наножидкостей в прямых круглых каналах в ламинарном и турбулентном режимах. Изучается влияние на теплогидравлическую эффективность наножидкостей таких факторов как тип наночастиц, их размер, концентрация, тип несущей жидкости и её температура.

В четвертой главе акцент смещается на течения в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена, как для наножидкости, так и для обычной воды. Проводится сравнение теплогидравлической эффективности наножидкости в прямых круглых каналах с эффективностью воды в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена.

В пятой главе сделан упор на изучение теплогидравлических свойств магнитных наножидкостей в присутствии магнитного поля. Изучение проводится как экспериментальными методами (PIV-методика, тепловизионная съемка), так и при помощи численного моделирования на основании предложенной автором модели. Использование такого широкого арсенала научных методов позволило дать объяснение аномально высокому повышению коэффициента теплоотдачи в такой постановке.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Замечания по содержанию и оформлению диссертации следующие (в порядке следования в тексте):

1. Раздел о личном вкладе. Считаю, что диссертанту следует более подробно и четко очертить собственный вклад по Главе 3 диссертации, т.к. она частично пересекается с разделами 5.3 и 5.4 докторской диссертации научного руководителя – Минакова А.В. В обеих работах (в упомянутых разделах) исследовался коэффициент теплоотдачи наножидкостей, при этом использовались одинаковые экспериментальные и численные методы исследования наножидкостей. Некоторые результаты встречаются в обеих работах. Считаю, что формулировки о личном вкладе “Часть экспериментальных исследований вынужденной конвекции наножидкостей в гладких каналах проводилась совместно с научным руководителем А. В. Минаковым.” в данном случае недостаточно.
2. В разделе “апробация и публикации” Гузей Д.В. указывает 14 статей в журналах из списка ВАК, опубликованных по материалам представленной диссертации. Однако, из данных 14 статей 11 уже были отмечены в диссертации научного руководителя Минакова А.В., как опубликованные по результатам его (Минакова А.В.) исследований. Также, в большинстве статей помимо диссертанта и научного руководителя присутствует множество других соавторов. Полагаю, что некоторые из них все же внесли некоторый вклад в работу, пусть и не определяющий. Считаю, что, во-первых, диссертанту стоит четко обозначить, какова доля результатов именно его диссертации в данных статьях. Во-вторых, стоит кратко описать вклад основных соавторов (если он достоин упоминания).

3. Во введении, в разделах “научная новизна” и “практическая значимость” автор диссертации пишет: “**Впервые** экспериментально обосновано применение наножидкостей для интенсификации конвективного теплообмена в гладких круглых каналах...”. Необходимо подробное объяснение, какой именно аспект по мнению диссертанта сделан **впервые**, т.к. аналогичные экспериментальные работы по изучению конвективного теплообмена с использованием наножидкостей в гладких круглых каналах проводятся уже довольно давно, и в литературе можно найти десятки работ с аналогичными экспериментами и результатами (как отмечает в обзорной Главе 1 и сам автор).
4. В разделе 2.1.2, на стр. 34 вводится определение локального коэффициента теплоотдачи α через плотность теплового потока q от стенок к жидкости, а также температуры стенок и жидкости, причем температура жидкости не измеряется в эксперименте, а определяется эмпирическим выражением, в которое также входит q . В обоих выражения (для температуры жидкости и для коэффициента теплоотдачи) значение теплового потока q считается постоянным вдоль канала. При этом, как показывают результаты, температура в стенке трубы распределена не равномерно. Это будет приводить к наличию теплового потока в твердом теле вдоль оси трубы и возможному изменению величины q , поступающей от тела к жидкости, в этом направлении. Наличие зависимости q от продольной координаты может существенно повлиять на получаемые значения коэффициента теплоотдачи, которые исследуются в данной работе. Необходимо подтверждение (экспериментальное или численное), что изменение q вдоль канала действительно пренебрежимо мало. На данный момент, результаты представленные, например, на Рис. 3.15 (численно полученная температура ядра потока) говорят скорее об обратном – при постоянном значении q должен наблюдаться линейный рост температуры жидкости вдоль канала, а полученные зависимости не совсем линейные.
5. Раздел 2.2.1. Автор добавляет в гомогенную модель (как в ламинарном, так и турбулентном режиме) зависимость плотности наножидкости от температуры за счет теплового расширения. Я считаю это излишним и нецелесообразным усложнением модели, т.к. на рассматриваемых в работе перепадах температуры (порядка 10 градусов), эффект теплового расширения будет ничтожным (около 0.1%).
6. Раздел 2.2 посвящен описанию численного моделирования рассматриваемых в работе процессов. При этом, в разделе представлена **математическая** модель (рассматриваемая система уравнений), но не **численная** – т.е. практически отсутствует описание того, как именно эти системы уравнений решались. А именно:
 - Отсутствует информация о схемах дискретизации по пространству в уравнениях различных членов (конвективных, диффузионных), к примеру, схемы “по потоку/против потока/центральные”, какого они порядка.
 - Не указывается, решалась ли система уравнений для стационарного состояния, либо решение искалось методом установления.
 - Нет информации о том, какой метод использовался для решения уравнений со связью по скорости-давлению (например, SIMPLE, PISO, другие).
 - По-видимому, в разделе 2.2 моделируется связанная задача – жидкость и твердое тело (стенки трубы), т.к. автор пишет “На **внешней** стенке обогреваемой части трубки в расчетах задавалось значение плотности теплового потока”. Однако нигде в тексте явно не указывается, что проводится также расчет в твердом теле, а также не описываются используемые для этого уравнения. По результатам этого понять также нельзя, т.к. распределение температуры в твердом теле, полученное в расчетах, нигде не представлено.

- Описание граничных условий неполное. Например, не указано, какие граничные условия по скорости и температуре задавались на границе жидкости и твердого тела. Также, написано, что на входе задавались условия Дирихле, но не написано по каким именно переменным – вопрос возникает, т.к. условия на температуру и концентрацию (которые тоже имеют тип Дирихле) прописаны отдельно и в явном виде. Написано, что на выходе задавались условия Неймана. Но т.к. условия Неймана, это условия на значение производной функции, то необходимо написать, чему же равнялись эти производные, а в тексте это никак не указано.

Считаю, что в работе должна быть представлена вся необходимая информация по численному методу, позволяющая в точности воспроизвести результаты моделирования.

7. Разделы 3.1.1 и 3.1.2. Для качественного объяснения полученных результатов по коэффициенту теплоотдачи в ламинарном режиме используется эмпирическое выражение для числа Нуссельта из книги Цветкова и Григорьева. Однако можно заметить, что данное выражение плохо описывает полученные результаты. Во-первых, формула дает степенную зависимость коэффициента теплоотдачи и числа Нуссельта от числа Рейнольдса с показателем 1/3. В то же время, зависимости, полученные в эксперименте, практически линейные (Рис. 3.4а, 3.5а, 3.8а). Во-вторых, коэффициент пропорциональности, определяемый формулой $c_p^{1/3} \lambda^{2/3} \mu^{2/3}$ (при $Re = \text{const}$) также не согласуется с результатами эксперимента.

В случае турбулентного режима используется другое эмпирическое выражение – формула Михеева. Но формула Михеева также не всегда может качественно объяснить полученные результаты. К примеру, немонотонная зависимость коэффициента теплоотдачи от размера частиц оксида кремния, полученная в эксперименте (Рис. 3.21б) объясняется диссертантом через немонотонную зависимость коэффициента пропорциональности $c_p^{0.43} \lambda^{0.57} \mu^{0.43}$ от этого размера. Однако, если построить данную зависимость по данным с Рис. 3.19, то никакой немонотонности не обнаруживается.

Резюмируя, считаю, что используемые эмпирические формулы не могут быть использованы для качественного объяснения полученных в эксперименте результатов, а проведенные на их основе рассуждения должны быть переосмыслены и переработаны.

8. Выводы к Главе 3. Автор пишет, что “Использование гомогенной модели... позволяет с хорошей точностью описывать процесс течения и конвективного теплообмена наножидкостей”. Мне кажется, тут диссертанту стоило бы добавить, что данный вывод справедлив только для ньютоновских наножидкостей, которые и изучались в данной работе.
9. Выводы к Главе 3. На основании полученных результатов о влиянии температуры наножидкости на эффективность теплообмена, автор заключает “С практической точки зрения выгодно иметь входную температуру наножидкости в диапазоне от 20–35 градусов Цельсия”. Я не согласен с таким выводом. Несмотря на то, что отвод тепла растёт, повышение температуры охлаждающей жидкости на 10-20 градусов ведет к соответствующему (немного меньшему) росту и температуры самого охлаждаемого тела (в данном случае, трубы) в стационарном режиме. На практике, в случае, например, процессоров в телефонах и компьютерах, важна именно температура (а не уровень теплоотдачи), т.к. есть температурный порог, при котором происходит существенное падение производительности системы либо полное её отключение. Таким образом, тезис о **практической** выгоде использования более горячих наножидкостей мне кажется спорным.
10. Выводы к Главе 3. На основании полученных результатов автор делает выводы о влиянии таких факторов, как “концентрация, размер и материал наночастиц, свойства базовой жидкости, начальная температура теплоносителя” на величину коэффициента теплоотдачи. Однако, вышеперечисленные факторы влияют на коэффициент теплоотдачи не напрямую, а через изменение коэффициентов переноса (вязкости и теплопроводности), как показывает сам автор в

диссертации. Таким образом, я считаю, что все сделанные в Разделе 3.3 выводы справедливы только для **конкретных**, рассмотренных в работе наножидкостей. Для других же наножидкостей изменение, скажем, размера частиц может приводить к обратному влиянию на коэффициенты переноса (например, уменьшению вязкости, а не увеличению) и следовательно, обратному влиянию на коэффициент теплоотдачи. Хоть автор и пишет, на какой конкретно наножидкости какой из результатов был получен, но выводы сформулированы так, как если бы они были применимы к любой наножидкости. Считаю, что диссертант должен прокомментировать, применимы ли его выводы к любой наножидкости, и если да, то привести аргументы в пользу этого мнения.

11. В разделе 4.7 на странице 107 диссертант проводит сравнение теплогидравлической эффективности различных конфигураций и делает, например, вывод, что “Наножидкость с размером частиц 105 нм на 11% выше по теплогидравлической эффективности, чем канал со сферическими выступами с водой в качестве теплоносителя”. Такое сравнение и данный вывод являются не вполне корректными, т.к. погрешность определения теплогидравлической эффективности составляет около 12% ($12 = 5+5+1+1$, по погрешностям входящих в ее определение величин, представленным в таблице 2.1), а значит любая разница между двумя значениями ниже $12+12 = 24\%$ не может считаться вполне достоверной. Это же замечание касается и вывода в следующем абзаце: “Наножидкость с частицами 44 нм уступает каналам с искусственными интенсификаторами теплообмена по теплогидравлической эффективности на 16% и 33% каналам со сферическими выступами и кольцевой накаткой соответственно”. Таким образом, т.к. разница значений теплогидравлической эффективности между разными конфигурациями, представленными в данном разделе чаще всего не превышает 24%, я бы рекомендовал воздержаться в разделе от сравнений вида “лучше/хуже/ниже/выше”.

12. В выводах главы 4 автор заключает: “наножидкости в гладких каналах имеют теплогидравлическую эффективность, сопоставимую с теплогидравлической эффективностью воды в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена.” При этом опускается тот факт, что теплогидравлическая эффективность обеих этих конфигураций также не превосходит теплогидравлической эффективности обычной воды в прямых гладких каналах (Рис. 4.14, 4.15). Не стоит ли тогда заключить, что в случае использования теплогидравлической эффективности как целевого параметра, ни использование наножидкостей, ни использование поверхностных интенсификаторов не дает повышения эффективности и таким образом не является целесообразным?

13. В продолжение предыдущего замечания. Гузей Д.В. делает вывод о теплогидравлической эффективности наножидкостей в целом, хотя в разделе изучается всего одна конкретная наножидкость – на основе оксида циркония. Может ли автор показать, что данный вывод будет справедлив для любых наножидкостей? Если нет, считаю, что вывод стоит немного переформулировать.

Несмотря на сделанные выше замечания, в целом оцениваю работу крайне положительно. Диссертация Гузей Дмитрия Викторовича представляет завершённое исследование, выполненное на высоком уровне. Приведенные публикации достаточно полно отражают основные результаты работы. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация, по своей актуальности, новизне и объёму выполненных исследований отвечает требованиям п.9 “Положения о порядке присуждения ученых степеней” установленным ВАК к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9. – “Механика жидкости, газа и плазмы” (по физико-математическим наукам). Считаю, что Гузей Дмитрий Викторович заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук по специальности

01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”,

научный сотрудник лаборатории наномеханики

Научно-исследовательского института механики

Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,

119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1.

КОСЬЯНЧУК Василий Викторович

06.06.2022

Контактные данные: тел.: +7(967)2927044, e-mail: vasiliy_ksnk@mi

Подпись научного сотрудника В.В. Косьянчука удостоверяю

06.06.2022

Рязанцева Мария
ученый секретарь

ВНГ
кабинет М59

Председателю
диссертационного совета
Д 003035.02
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, Косьянчук Василий Викторович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Гузей Дмитрия Викторовича на тему: Исследование вынужденной конвекции наножидкостей на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	К.ф.-м.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.02.05- механика жидкости, газа и плазмы
Ученое звание	-
Академическое звание	-
Тел:	8 (967) 292 7044,
E-mail:	vasiliy_ksnk@mail.ru
Должность	Научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатории Наномеханики Научно-исследовательский институт механики
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Ведомственная принадлежность орг.	Полномочия учредителя Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова от имени Российской Федерации осуществляются Правительством Российской Федерации
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
Web-сайт организации.	http:// www.msu.ru/
Телефон организации.	8 (495) 939-10-00
E-mail организации.	info@rector.msu.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 7 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Kosyanchuk V.,	Non-stationary rarefied gas flow in a plane channel with a series of

	Pozhalostin V.	oscillating barriers // European Journal of Mechanics, B/Fluids, -2022, -V.92, -Pp.90-99.
2	Yakunchikov A., Kosyanchuk V., Kroupnov A., Pogosbekian M., Bryukhanov I., Iuldasheva A.	Potential energy surface of interaction of two diatomic molecules for air flows simulation at intermediate temperatures // Chemical Physics, 2020, -Vol 536, -№ 110850.
3	Kosyanchuk V., Yakunchikov A.	Separation of a binary gas mixture outflowing into vacuum through a micronozzle // Physics of Fluids, 2021, -Vol.33(8), № 082007.
4	Kosyanchuk V., Yakunchikov A.	A detailed multiscale study of rotational-translational relaxation process of diatomic molecules // Physics of Fluids, 2021, -Vol.33(2), -№ 022003.
5	Yakunchikov A., Kosyanchuk V.	A new principle of separation of gas mixtures in non-stationary transitional flows // Acta Astronautica, 2019, -Vol.163, -Pp. 120-125.
6	Kosyanchuk V.V., Yakunchikov A.N.	Numerical study of rarefied gas flows in microchannels with oscillating elements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, -2018, -Vol.387(1), 012042.
7	Kosyanchuk V.V., Yakunchikov A.N.	Free-Molecular Gas Flow in a Channel with Curving Boundary // Fluid Dynamics, -2018, -Vol.53(3), -Pp. 417-427.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

Дата

Подпись

17 февраля 2022

Нач. отдела кадров
НИИ механики МГУ

Подпись заверено
17.02.2022