

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Снегирёва Александра Юрьевича

на диссертацию Старинской Елены Михайловны

«Тепломассоперенос при испарении капель бинарных смесей и наножидкостей»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность данной работы обусловлена чрезвычайно широким кругом физических явлений и практических приложений, в которых имеет место испарение капель жидкости. В то время как классическая теория с хорошей точностью описывает динамику испарения капель однокомпонентных жидкостей, проблема количественного прогнозирования характеристик испарения многокомпонентных смесей, как и жидкостей, содержащих взвешенные наночастицы, остаётся нерешённой. Нацеленность представленной работы на получение новых экспериментальных данных о динамике испарения именно этих видов жидкостей, а также на выявление механизмов испарения бинарных неидеальных растворов и жидкостей с наночастицами позволяет сделать вывод о её **актуальности**.

Содержание работы. Работа содержит введение, четыре главы, заключение (основные результаты и выводы), списки условных обозначений и используемых источников.

Во **введении** обосновывается необходимость данного исследования с учётом разрозненности и противоречивости имеющейся информации об испарении рассматриваемых типов жидкости, а также их практической значимости для технологий сжигания топлив, окраски, сушки, нанесения покрытий. Формулируется цель работы – экспериментальное исследование испарения капель бинарного раствора этанол-вода и наножидкости (вода с добавками наночастиц диоксида кремния), и соответствующие конкретные задачи. Приводится обсуждение новизны данной работы, её теоретической и практической значимости, апробации и публикации результатов, применённых методов исследования, личного вклада соискателя.

Глава 1 содержит литературный обзор современного состояния исследований тепло- и массообмена при испарении капель. Литературный обзор представляет лаконичный, но достаточно полный анализ предыдущих экспериментальных и теоретических исследований. Опубликованные работы объединены по группам, в которых рассматриваются капли падающие или левитирующие, подвешенные на нити, а также расположенные на поверхности. Отмечено существенное влияние теплообмена жидкости с подвесом. Специальные разделы литературного обзора посвящены испарению водно-спиртового раствора и жидкостей при наличии примесей наночастиц. При этом отмечаются существенные разногласия в интерпретации экспериментальных данных и физических механизмов, управляющих испарением жидкости.

Обзор литературы позволяет автору обоснованно заключить, что закономерности протекания и ключевые механизмы испарения многокомпонентных жидкостей и суспензий наночастиц недостаточно изучены и сделать вывод о необходимости пополнения массива экспериментальных данных о динамике испарения для этих сценариев.

Глава 2 содержит описание используемых автором экспериментального метода и математической модели. Экспериментальный стенд представляет аэродинамическую трубу, позволяющую задавать требуемые значения скорости (от 0.1 до 3 м/с) и температуры (от 20 до 200 С) потока воздуха, омывающего каплю. Сферическая капля подвешивается на перекрестии тонких (100 мкм) нитей. Изменение размера испаряющейся капли регистрировалось цифровым микроскопом. Одновременно с помощью тепловизионной камеры измерялась температура поверхности капли. Приводится оценка неопределённости измерений. Показано, что в тестовых измерениях для воды и ацетона воспроизводятся измерения, ранее выполнявшиеся другими авторами.

Математическая модель предполагает квазистационарность тепломассопереноса как в газовой, так и в жидкой фазе. Кратко излагаются особенности моделирования испарения многокомпонентной жидкости и теплообмена капли с подвесом, существенная роль которого

обнаруживается при сравнении расчётной и измеренной динамики изменения диаметра капли с течением времени. Приводится анализ вклада разных компонентов теплового потока на поверхности капли (конвективного, в том числе при естественной и вынужденной конвекции, радиационного и кондуктивного от поддерживающих нитей). Показано, что установившаяся температура поверхности капли существенно (на 5-8 С) превышает равновесное адиабатическое значение. Данное рассогласование объяснено теплоподводом через поддерживающие нити. Выполнены тестовые расчёты динамики испарения капли при использовании трёх ранее опубликованных способов вычисления числа Нуссельта и показано, что все три способа дают близкие результаты, согласующиеся с данными измерений изменения диаметра и температуры поверхности капель во времени.

Методика, апробированная для испарения однокомпонентных жидкостей, затем применяется для бинарного раствора углеводородов (н-гептан, н-декан). При этом продемонстрирована стадийность испарения, причем параметры испарения соответствуют испарению более летучего компонента на первой стадии, а менее летучего – на второй.

Показано, что согласие расчётных и измеренных зависимостей диаметра и температуры капли от времени имеет место только при учёте теплообмена капли с подвесом.

В **Главе 3** приводятся результаты авторского исследования динамики испарения капель бинарного раствора этанол-вода. Зависимости диаметра и температуры поверхности капли измерены при разных температурах (21, 50 и 100 С) и скоростях набегающего потока (0.1 и 1.5 м/с, а также в условиях естественной конвекции). В каждом случае выполнено измерение для нескольких концентраций этанола в растворе от 0 до 94%. Результаты измерений обобщаются в координатах t/d_0^2 , $(d/d_0)^n$, где показатель степени принимается равным 2 при малых и 3/2 при больших скоростях газа. По углу наклона этих зависимостей определяется константа скорости испарения K .

При промежуточных значениях концентраций этанола наблюдается стадийный характер испарения, причём в условиях естественной конвекции автор выделяет не две, а три стадии. Автор делает вывод о том, что характерная для бинарных растворов углеводородов стадийность испарения не столь выражена для растворов этанола в воде и объясняет это неидеальностью таких растворов. Наиболее интересный результат заключается в том, что существует такой диапазон концентраций этанола и температуры окружающей среды, в котором зависимость константы скорости испарения от соотношения компонентов в растворе оказывается немонокотонной. Более того, максимальное значение константы скорости испарения превышает соответствующее значение для наиболее летучего компонента. Другими словами, возникает синергетический эффект интенсификации испарения бинарного раствора.

Глава 4 посвящена испарению капель водяной суспензии с наночастицами оксида кремния SiO_2 (наиболее вероятный диаметр 12 нм). Рассмотрены суспензии с массовой долей наночастиц 0.1, а также 2, 3, ... 7 %. Параметры окружающей среды соответствуют приведённым выше для испарения бинарных растворов. Получены следующие результаты. При малой концентрации наночастиц (0.1 %) испарение капли протекает в две стадии, на первой из которых скорость испарения и температура поверхности капли соответствуют испарению чистой воды, а на второй имеет место более медленное испарение при более высокой температуре поверхности. По мере увеличения концентрации наночастиц возможно как снижение, так и увеличение скорости испарения капли и температуры её поверхности по сравнению с испарением чистой воды. Как и в случае испарения бинарного раствора этанола и воды, зависимость константы скорости испарения от концентрации наночастиц оказывается немонокотонной.

Математическая модель испарения капли модифицирована с учётом увеличения концентрации наночастиц по мере уменьшения объёма жидкости и соответствующего изменения теплофизических свойств. Предложен механизм испарения жидкости с наночастицами, которые с течением времени концентрируются вблизи межфазной поверхности, тем самым препятствуя испарению. При этом на зависимости температуры поверхности от времени выделяются четыре характерных этапа.

В **Заключении** перечислены основные результаты работы.

Научная новизна. По моему мнению, наиболее важными являются следующие новые результаты, полученные в данной работе.

1. Результаты одновременных измерений зависимости диаметра капли и температуры её поверхности для бинарных растворов этанола в воде и для водяных суспензий наночастиц диоксида кремния в широком диапазоне скоростей и температур набегающего потока, а также концентраций компонентов.

2. Экспериментально установлена немонотонная зависимость константы скорости испарения от концентрации этанола в его бинарном растворе с водой, и показана возможность достижения скорости испарения, превышающей значения для каждого из компонентов смеси.

3. Установлено влияние концентрации наночастиц на динамику испарения жидкости. Выявлена стадийность испарения жидкости при наличии наночастиц и предложен механизм испарения, учитывающий накопление наночастиц вблизи межфазной поверхности с течением времени.

Достоверность результатов и выводов определяется калибровкой используемых измерительных средств, многократным повторением измерений в идентичных условиях, согласием результатов тестовых измерений с ранее опубликованными экспериментальными данными.

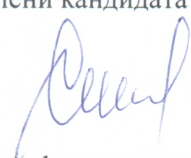
По работе имеются следующие **вопросы и замечания**.

1. При обработке результатов эксперимента автор использует либо формулировку d^2 (при малой скорости газового потока), либо $d^{1.5}$ в остальных случаях. Следует отметить, что в практических приложениях испарение движущейся капли не протекает в условиях постоянной относительной скорости. Даже если в начале движения скорость относительно газа велика, указанная скорость быстро снижается до малых значений, и за время снижения относительной скорости испаряется малая часть массы жидкости. Сказывается ли данное обстоятельство на выводах, которые автор делает по результатам обработки результатов измерений?
2. На графиках рекомендуется показать доверительный интервал для экспериментальных значений, который учитывает не только неопределённость однократного измерения (оцененную в разделе 2.4), но и статистическую неопределённость, характеризующую повторяемость результата в случае многократных измерений с идентичными исходными данными. Это в первую очередь касается немонотонных зависимостей константы скорости испарения от концентрации компонентов испаряющейся жидкости, выявленных в данной работе (например, рис. 3.12, 4.17 и др.).
3. На стр. 31-32 отмечено, что равенство (2.23) является предположением о подобии тепло- и массопереноса. На самом деле это не предположение, а прямое следствие идентичности массовых потоков, вычисляемых при рассмотрении диффузии пара (равенство (2.16)) и тепла (равенство (2.17)). В то же время равенство (2.23) обуславливает равновесное значение температуры капли. Делается ли теоретическая оценка температуры адиабатического насыщения (равновесной температуры капли, которая достигается после релаксации поля температуры внутри капли)?
4. Формулы Ранца-Маршалла, используемые в анализе компонентов теплового потока в разделе 2.7.6, описывают теплообмен при обтекании сферы в отсутствие вдува. В то же время, экспериментальное значение числа Нуссельта, определяемое по формуле (2.34), вычисляется для испаряющейся капли, т. е. при наличии вдува. Насколько корректно сравнение этих величин, которое обсуждается в первом параграфе стр. 44?
5. При анализе испарения бинарных жидкостей остаётся неясным, как моделируется диффузия компонентов в жидкой фазе. По-видимому, предполагается равномерное распределение концентраций компонентов по радиусу капли в течение всего времени испарения.

Было бы полезно привести количественные оценки, подтверждающие применимость такого допущения.

Приведённые вопросы и замечания носят уточняющий характер, не влияют на основные результаты, полученные в данной работе, и не снижают её высокой научной и практической значимости. Работа носит завершённый характер. Результаты работы достаточно полно опубликованы в профессиональных изданиях (в том числе в изданиях из перечня ВАК и в журнале International Journal of Heat and Mass Transfer) и представлены на профильных российских и международных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Заключение. С учётом изложенного считаю, что содержание диссертации Старинской Елены Михайловны «Тепломассоперенос при испарении капель бинарных смесей и наножидкостей» **соответствует** паспорту специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по физико-математическим наукам. В данной научно-квалификационной работе получены новые экспериментальные данные и выявлены новые закономерности динамики испарения многокомпонентных жидкостей и суспензий с наночастицами, которые представляют несомненное теоретическое значение для апробации математических моделей и программного обеспечения, а также практический интерес для оптимизации технологических процессов с участием испаряющихся жидкостей. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание кандидата физико-математических наук в соответствии с пунктами 9-11, 13, 14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор **заслуживает** присуждения степени кандидата физико-математических наук.


Снегирёв Александр Юрьевич
доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника),
профессор,
профессор Высшей школы Прикладной математики и вычислительной физики
Физико-механического института
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Почтовый адрес: Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 194356
Тел. (раб.): (812) 2944276 Email: a.snegirev@phmf.spbstu.ru
12 мая 2022 г.



Я, Снегирёв Александр Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Старинской Елены Михайловны, и их дальнейшую обработку.