

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Старинской Елены Михайловны «Тепломассоперенос при испарении капель бинарных смесей и наножидкостей»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы диссертации

Процессы тепломассопереноса в системах с потоками капель жидкостей типичны для многих технологических процессов различных отраслей промышленности (энергетика, химическая, машиностроение и др.). В большинстве практически значимых случаев происходит испарение капель (достаточно часто интенсивное испарение), которое играет важную роль в теплофизических процессах, с участием капель и паров жидкости. Попытки описать процесс и интенсивность испарения предпринимались многократно со времен Нуссельта, но пока нет оснований утверждать, что созданы математические модели, адекватно описывающие этот фазовый переход на поверхности капли без использования определяемых в специальных экспериментах эмпирических коэффициентов (например, коэффициентов аккомодации). Проблемы с теорией испарения капель обусловлены объективными причинами – этот фазовый переход (как показывают многочисленные, но неудачные попытки большой группы исследователей), нельзя описать с необходимой для математического моделирования адекватностью физических процессов в рамках моделей механики сплошной среды. Переход же на атомарно-молекулярный уровень (который, скорее всего, безусловно необходим) пока не удастся. Поэтому эксперимент остается в настоящее время фактически основным инструментом анализа процессов испарения, как одиночных капель, так и их некоторой совокупности.

В дополнение к вышеизложенному следует подчеркнуть, что для процессов испарения капель бинарных смесей не только отсутствует общая теория, но даже экспериментальных данных очень не много. Еще более неизученными являются процессы испарения наножидкостей. Последние десятилетия, после всплеска интереса к наноматериалам и нанотехнологиям в конце двадцатого века и последующего длительного периода «работы» госкорпорации «Роснано», стали, образно говоря, (совершенно незаслуженно) терминами нарицательными. Вследствие этого интерес исследователей и, соответственно, публикационная активность в этой области науки снизились.

В результате, экспериментальных данных по характеристикам процессов испарения наножидкостей опубликовано очень мало, и эти данные достаточно противоречивы.

В связи с вышеизложенным тема диссертации Е.М. Старинской, целью которой является экспериментальное исследование испарения одиночных подвешенных капель бинарного раствора «этанол-вода» и наножидкостей для

широкого диапазона изменения концентраций компонентов, а также скоростей и температур окружающей среды, безусловно актуальна.

В дополнение к вышеизложенному, оценивая актуальность темы диссертации Е.М. Старинской, следует отметить, что по своим цели, задачам, методам их решения, результатам и защищаемым положениям она полностью соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утверждено указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

Общая характеристика диссертации.

Рукопись диссертации включает введение, четыре главы, заключение, список сокращений и списка литературы. Объем рукописи 114 листов (всего 78 рисунков). Список литературы включает 176 наименований.

В первой главе автор, в соответствии с общепринятыми нормами, проводит анализ современного состояния исследований процессов тепло- и массообмена при испарении капель смесей и наножидкостей. Основной вывод, сформулированный по результатам этого анализа – результаты экспериментов тепло- и массопереноса при испарении капель зачастую противоречивы.

Во второй главе рукописи достаточно подробно приведено описание разработанного автором диссертации экспериментального стенда, методики исследований, представлены результаты анализа погрешностей (неопределенностей по новой терминологии) проведенных измерений. В этой же главе приведены результаты экспериментов по определению зависимости параметра K , введенного в рассмотрение автором диссертации, характеризующего скорость испарения, от скорости движения внешней газовой среды – потока воздуха, а также по оценке тепловых потоков к поверхности испаряющейся капли.

Третья глава посвящена описанию результатов, выполненных автором диссертации экспериментов, по определению характеристик процессов тепло- и массообмена при испарении капель бинарного раствора «этанол-вода» при разных концентрациях первого компонента в диапазоне температур $20 \div 100$ °С и скоростей потока воздуха от 0 до 1,5 м/с. Автором выделены, по результатам экспериментов в неподвижной среде, характерные стадии процесса. Зависимость квадрата безразмерного диаметра капли от приведенного времени представлена в виде кусочно-линейной аппроксимации, для каждого отрезка, для которого может быть определен свой коэффициент K . Для процессов испарения в условиях движения внешней среды установлено, что зависимость скорости испарения от времени имеет другой вид. Сформулирована гипотеза, объясняющая изменение характера этой зависимости в условиях вынужденной конвекции по сравнению с неподвижной средой. Проведен анализ влияния концентрации этанола в жидкости капли на характеристики процесса испарения. Выделена немонотонность этого процесса.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований процессов испарения капель наножидкости (смесь дистиллированной воды и сферических наночастиц диоксида кремния). Целью экспериментов было установление зависимости скорости испарения капель такой наножидкости от концентрации наночастиц. Установлено влияние температуры на выделенные закономерности. Также установлена устойчивая тенденция снижения скорости испарения при малой концентрации в капле частиц диоксида кремния. По результатам экспериментов выделены физические особенности испарения капель исследовавшейся наножидкости и сформулировано описание механизма испарения в рассматриваемых условиях, выделен интересный эффект скопления частиц нанooksида железа у свободной поверхности капли.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

Общая методология и методика исследования

Методики исследований, применяемые в диссертации, включают совокупность теоретических и экспериментальных подходов к исследованию процессов испарения капель бинарных смесей и наножидкостей в условиях неподвижной среды и при обтекании капли потоком воздуха. Автор диссертации модернизировала (достаточно существенно) известный и использующийся многими исследователями метод подвешивания капли жидкости на нитях. При разработке методик регистрации основных характеристик исследовавшихся процессов автор диссертации использовала современные представления о процессе испарения капель жидкостей (результаты экспериментов, модели, математический аппарат современной теории испарения жидкостей, теоретические следствия). При планировании, организации, проведении экспериментальных исследований и обработке результатов большое внимание уделялось анализу неопределенностей (погрешностей результатов измерений по старой терминологии) экспериментальных данных. По результатам анализа и обобщения, установленных при проведении фундаментальных экспериментальных исследований основных закономерностей исследовавшихся в диссертации процессов, Е.М. Старинская сформулировала группу гипотез о механизмах процессов испарения капель бинарных смесей и наножидкостей в условиях нагрева и обтекания потоком воздуха. Все выводы по механизмам испарения соответствуют современным представлениям о физике процессов фазовых переходов в жидкостях.

Научная новизна полученных результатов

Е.М. Старинской получена большая группа результатов экспериментальных исследований, имеющих фундаментальное значение. Наиболее значимыми и в полной мере соответствующими современному критерию новизны, по мнению оппонента, являются следующие.

1. Разработана методика экспериментальных исследований основных закономерностей процессов испарения капель жидкости, подвешенных на перекрестие тонких нитей в потоке воздуха.

2. Установлено, что лучистый поток к поверхности испаряющейся капли не влияет на скорость испарения последней. Также установлено, что свободная конвекция заметно влияет на скорость испарения при испарении относительно больших капель.

3. Экспериментально установлены зависимости скорости испарения капель исследовавшихся жидкостей от группы наиболее значимых факторов. Зарегистрировано слабое влияние начальной концентрации этанола в его смеси с дистиллированной водой на изменение температуры поверхности капли от времени.

4. Выделена немонотонность скорости испарения смеси в зависимости от концентрации более летучего компонента.

5. Установлены экспериментальные значения скоростей испарения капель коллоидных систем «воды-наночастицы диоксида кремния».

6. Сформулирована гипотеза о механизме испарения наножидкости с низкой концентрацией наночастиц. Показано, что вследствие диффузии наночастиц в жидкости уменьшается, с ростом времени испарения, интенсивность этого фазового перехода (частицы скапливаются вблизи свободной поверхности капли).

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных автором диссертации результатов, и соответственно, защищаемых положений и выводов обеспечивается применением современных методов и средств регистрации температур поверхности и размеров капель в процессе их испарения, анализом неопределенностей (погрешностей) результатов измерений, проведением калибровочных и тестовых испытаний.

Практическая значимость

Результаты диссертационного исследования Е.М. Старинской могут быть использованы при разработке теплообменных аппаратов; систем высокотемпературной очистки жидкости от примесей; устройств, использующих капельное охлаждение. Также результаты экспериментов автора диссертации могут использоваться при верификации современных пакетов программ (и вновь создаваемых), при оценке работоспособности последних, при решении задач испарения капель сложных жидкостей.

Замечания по диссертации

1. При описании результатов экспериментов применяются иллюстрации, в которых достаточно часто используются система координат с размерной переменной по оси абсцисс и безразмерной переменной по оси ординат (например, рис.2.25 на стр. 48, рис. 2.26 на стр.49). Такое графическое представление результатов исследований нетипично и, можно сказать, не

вполне соответствует основным положениям теории подобия. В рукописи нет объяснения целесообразности использования такой системы координат. В то же время есть рисунки, например, рис.2.29 на стр. 51 в которых приведены зависимости диаметра капли от времени.

2. Использование выражения (3.1) (стр.55) для изменения размеров капли, полученного для диффузионной теории испарения, в условиях неподвижной внешней среды, скорее всего оправдано. Но при скорости движения окружающей среды 1,5 м/с унос паров испаряющейся жидкости от поверхности капли происходит, вероятно, в режиме конвекции, характерное время которой в рассматриваемом случае заметно меньше характерного времени диффузии. Правомерность использования диффузионной теории в случае движения внешней среды не обосновывается.

3. Представление зависимостей, иллюстрирующих влияние концентрации этанола на скорость испарения, в виде $K(C)$ (рис.3.21 стр.69) не вполне физически обоснована. Размерность коэффициента $[K]=\text{м}^2/\text{с}$, совпадающая с размерностью коэффициентов диффузии, существенно усложняет анализ физики исследуемого процесса. При представлении результатов экспериментальных или теоретических исследований процессов испарения жидкостей, как правило, используют такие характеристики, как массовая (размерность $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$) или линейная (размерность м/с) скорости испарения.

4. Приведенные на рис.3.21 зависимости с локальными экстремумами построены, скорее всего, «по точкам», как говорят экспериментаторы. Поэтому физика немонотонности этих зависимостей не очевидна. Уместным был бы более детальный анализ физических причин существования локальных экстремумов на зависимостях $K(C)$.

Сделанные замечания не снижают значимость для науки и практики полученных в диссертации Е.М. Старинской результатов, положений и выводов.

Заключение о соответствии диссертации критериям.

Диссертация Е.М. Старинской является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно, содержит результаты экспериментальных исследований, соответствующие критериям новизны.

Диссертация Е.М. Старинской соответствует специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи диссертации, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации Е.М. Старинской «Тепломассоперенос при испарении капель бинарных смесей и наножидкостей» можно сделать обоснованное заключение о том, что она соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении

ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №824 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а её автор Старинская Елена Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Профессор Научно-образовательного
центра И. Н. Бутакова, Инженерной
школы энергетики Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет», доктор физико-
математических наук (01.04.14 -
Теплофизика и молекулярная
физика), профессор
13.05.2022



Кузнецов Гений Владимирович

Подпись Г.В. Кузнецова заверяю:

Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета,
кандидат технических наук



Кулинич Екатерина Александровна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30,
e-mail: marisha@tpu.ru,
тел. +7 (3822) 606-248, 701-777, вн 16-15.