

УДК 536.7: 536.423: 66.047.3.049.6

***ТЕРМОДИНАМИКА НЕРАВНОВЕСНОГО ПЕРЕНОСА ВОДЫ В  
ВАКУУМЕ: МЕХАНИЗМ НАПРАВЛЕННОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА***

***Бабурин И.С.***

*аспирант*

*Уральский государственный аграрный университет,*

*Екатеринбург, Россия*

***Панков Ю.В.***

*к. хим. наук, доцент*

*Уральский государственный аграрный университет,*

*Екатеринбург, Россия*

**Аннотация**

В работе рассмотрен механизм направленного движения водяного пара в глубоком вакууме от нагретой поверхности к холодному конденсатору. Показано, что определяющей силой является не разность температур как таковая, а резкая, экспоненциальная зависимость давления насыщенного пара от температуры. Это создаёт колоссальный перепад парциальных давлений, который обеспечивает односторонний молекулярный поток. Перенос тепла осуществляется за счёт скрытой теплоты парообразования, а направление процесса строго соответствует второму началу термодинамики – росту энтропии при фазовом переходе. Результаты работы имеют практическое значение для вакуумной дистилляции, сублимационной сушки и проектирования тепловых труб.

**Ключевые слова:** вакуумное испарение, фазовый переход, давление насыщенного пара, химический потенциал, тепломассоперенос, неравновесная термодинамика.

***THERMODYNAMICS OF NONEQUILIBRIUM WATER TRANSPORT IN  
VACUUM: MECHANISM OF DIRECTED HEAT AND MASS TRANSFER***

***Baburina I.S.***

*graduate student,*

*Ural State Agrarian University*

*Ekaterinburg, Russia*

***Pankov Y.V.***

*PhD, Associate Professor,*

*Ural State Agrarian University*

*Ekaterinburg, Russia*

**Abstract**

This paper examines the mechanism of directed water vapor motion in a deep vacuum from a heated surface to a cold condenser. It is shown that the driving force is not the temperature difference per se, but rather the sharp, exponential dependence of saturated vapor pressure on temperature. This creates a massive difference in partial pressures, which ensures a unidirectional molecular flow. Heat transfer occurs due to the latent heat of vaporization, and the direction of the process strictly corresponds to the second law of thermodynamics - the increase in entropy during a phase transition. The results of this work have practical significance for vacuum drying, freeze-drying, and vacuum distillation.

**Keywords:** vacuum evaporation, phase transition, saturated vapor pressure, chemical potential, heat and mass transfer, non-equilibrium thermodynamics

Процессы испарения воды в вакууме находят широкое применение в промышленности – от пищевой и фармацевтической сушки до космических систем терморегулирования. При этом фундаментальный вопрос о том, почему пар движется именно от горячей жидкости к холодной стенке, часто трактуется

упрощённо. В условиях глубокого вакуума отсутствует сплошная среда, и перенос осуществляется отдельными молекулами, которые движутся баллистически. Возникает закономерное сомнение: почему молекулы не возвращаются обратно с той же вероятностью? Классическая термодинамика утверждает, что самопроизвольный перенос энергии возможен лишь при наличии градиента температуры. Однако в вакууме механизм этого переноса кардинально иной. В данной работе мы показываем, что истинной движущей силой является разность химических потенциалов, которая, в свою очередь, определяется экспоненциальной чувствительностью давления насыщенного пара к температуре.

В замкнутой системе при равновесии химические потенциалы жидкости и её пара равны. Как только в системе появляется холодная поверхность, локальное равновесие нарушается: химический потенциал пара вблизи холодной стенки становится ниже, чем у горячей жидкости. Возникает термодинамическая «разность потенциалов», которая заставляет молекулы переходить из области с более высоким потенциалом в область с более низким – точно так же, как электрический ток течёт от большего потенциала к меньшему [3, 4]. Основным физическим фактором, определяющим направление, – это исключительно сильная зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. Согласно уравнению Клапейрона–Клаузиуса, при понижении температуры всего на несколько десятков градусов давление насыщения падает в десятки и сотни раз. Например, при комнатной температуре (20 °С) оно составляет около 2,3 кПа, а при –20 °С – уже менее 0,1 кПа. Таким образом, даже умеренная разность температур порождает гигантский перепад давлений между горячим испарителем и холодным конденсатором. Именно этот перепад давлений создаёт односторонний молекулярный поток. Молекулы, покидающие горячую поверхность, имеют гораздо более высокую концентрацию в паровой фазе, чем молекулы, которые могли бы испариться с холодной стенки. Поэтому

результатирующий поток всегда направлен от горячего к холодному, а обратный поток пренебрежимо мал [2].

Каждая молекула, испаряясь с горячей поверхности, забирает с собой значительное количество энергии – скрытую теплоту парообразования (около 2,5 МДж на килограмм воды). Это приводит к охлаждению испарителя. При конденсации на холодной стенке та же энергия выделяется, нагревая конденсатор. Таким образом, сам водяной пар выступает в роли переносчика тепла, причём направление переноса массы однозначно совпадает с направлением переноса энергии – к холодной зоне [5]. С позиций второго начала термодинамики данный процесс является необратимым и сопровождается ростом энтропии. Переход молекул из более упорядоченного состояния (жидкость) в менее упорядоченное (пар) и последующее расширение в вакууме увеличивают энтропию системы. Обратный процесс – самопроизвольное испарение с холодной поверхности и конденсация на горячей – означал бы уменьшение энтропии, что невозможно в изолированной системе. Именно энтропийный барьер гарантирует, что поток всегда идёт «вниз» по градиенту химического потенциала.

Для проверки теоретических положений была собрана экспериментальная установка, основными элементами которой являлись вакуумная камера с крышкой из прозрачного поликарбоната, внутри которой поддерживалось давление около -0,1 МПа, ёмкость с дистиллированной водой, первоначально имевшей комнатную температуру ( $\approx 20$  °С), электрический нагреватель, расположенный под дном колбы и поддерживающий температуру наружной поверхности на уровне 50 °С, а также холодный аккумулятор () с температурой поверхности -18 °С, размещённый на верхней крышке камеры и служащий конденсатором. В процессе эксперимента давление в камере фиксировалось датчиком давления. Скорость испарения определялась по убыли массы воды с помощью прецизионных весов, а температура жидкости измерялась

термопарой, погружённой в ёмкость. Несмотря на подогрев дна до 50 °С, температура воды в объёме установилась на уровне 30 °С – это результат интенсивного охлаждения за счёт скрытой теплоты парообразования. Именно это значение принято за температуру испарителя. Температура конденсатора поддерживалась постоянной, равной –18 °С [6].

В ходе опыта было зафиксировано, что давление насыщенного водяного пара при температуре испарителя 30 °С составляет 4,24 кПа, тогда как давление насыщения над льдом при –18 °С равно всего 0,10 кПа. Экспериментально измеренный поток массы составил  $2,0 \times 10^{-2}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) практически совпадает с теоретическим значением  $2,1 \times 10^{-2}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) кинетической теории Герца–Кнудсена. Расхождение не превышает 5 %, что укладывается в погрешность измерений и допустимые упрощения модели (неидеальность коэффициента аккомодации, наличие следов остаточных газов). Таким образом, подтверждено, что результирующий поток направлен от горячей воды к холодному аккумулятору и определяется именно разностью давлений насыщения, а не непосредственно разницей температур. Визуальные наблюдения также показали интенсивное пузырьковое кипение воды при комнатной температуре (из-за низкого давления в камере), а на поверхности конденсатора быстро нарастал слой инея и льда, что свидетельствовало об эффективной конденсации пара [1].

Важно подчеркнуть, что в глубоком вакууме длина свободного пробега молекул составляет метры, поэтому они движутся практически без столкновений от поверхности испарения до стенок камеры. Плотность молекул, испущенных горячей поверхностью (30 °С), на много порядков выше плотности молекул, испущенных холодным конденсатором (–18 °С). Даже если отдельные молекулы с конденсатора отрываются и летят обратно, их число исчезающе мало по сравнению с основным потоком. Таким образом, результирующее движение всегда направлено к холодной стенке. Стационарный режим

## ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

возможен лишь тогда, когда существует эффективный сток – холодная поверхность, способная непрерывно конденсировать пар. В нашем эксперименте аккумулятор холода с температурой  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечивал такой сток. Если бы охлаждение прекратилось и температуры выровнялись, система быстро пришла бы к динамическому равновесию, и чистый поток прекратился бы. При абсолютном давлении 1,3 кПа остаточные газы (воздух) присутствуют в небольшом количестве. Их влияние на диффузию водяного пара незначительно, поскольку парциальное давление водяного пара ( $\sim 4$  кПа вблизи испарителя) существенно выше парциального давления воздуха. Это подтверждает корректность выбранного вакуумного режима.

Понимание рассмотренного механизма лежит в основе многих современных технологий. Вакуумные испарители в пищевой и химической промышленности позволяют концентрировать растворы при пониженных температурах, сохраняя полезные свойства продуктов. Сублимационные сушилки используются для получения сухих продуктов, крови и плазмы, а также для производства «сушки» в фармацевтике. Тепловые трубы с водяным заполнением эффективно работают в системах охлаждения космических аппаратов, где перенос тепла осуществляется именно испарением и конденсацией в вакууме. Предложенная качественная и полуколичественная модель позволяет инженерам рассчитывать производительность таких установок без сложных математических выкладок, опираясь на табличные данные давления насыщения [1,2,5,6].

Таким образом, направленный поток воды в вакууме от нагретой поверхности к холодной обусловлен не столько разностью температур, сколько экспоненциальной зависимостью давления насыщенного пара от температуры, создающей градиент химического потенциала. Плотность потока массы прямо пропорциональна разности давлений насыщения на горячей и холодной поверхностях – это фундаментальный вывод, подтверждённый экспериментом

при давлении –100 кПа и температурах 30 °С и –18 °С. Энергетической основой переноса служит скрытая теплота парообразования, а направление процесса полностью соответствует второму началу термодинамики – росту энтропии [3, 4]. Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими оценками (погрешность менее 5 %), что подтверждает корректность предложенного подхода. Дальнейшие исследования предполагают учёт неравновесных эффектов в приповерхностных слоях и влияния кривизны поверхности (эффект Томсона) на скорость испарения.

### Библиографический список:

1. Быков Н.Ю. Моделирование процесса конденсации при сферическом расширении водяного пара в вакуум // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т. 16. – № 2. – С. 189–199.
2. Злотник А.А., Ломоносов Т.А. Применение регуляризованных уравнений динамики гетерогенных бинарных смесей для моделирования фазовых переходов вода-пар // Математическое моделирование. – 2025. – Т. 37. – № 1. – С. 151–170.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – 4-е изд., доп. – Новосибирск: Наука, 1970. – 658 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. – 3-е изд., доп. – М.: Наука, 1976. – Т. 5. – 584 с.
5. Маринюк Б.Т., Крысанов К.С., Спритнюк С.В. Моделирование процессов гидродинамики, тепло- и массообмена в вакуумных градирнях // Труды международной научно-технической конференции. – М., 2019. – С. 45–52.
6. Трушляков В.И., Новиков А.А., Лесняк И.Ю., Паничкин А.В. Исследование процесса испарения жидкости со свободной поверхностью в замкнутой ёмкости при понижении давления и акустическом

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

воздействии // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26. – № 2. – С. 275–286.

7. Chang K., Wang Y.-Y., Li Y.-Z. A review of water sublimation cooling and water evaporation cooling in complex space environments // Progress in Aerospace Sciences. – 2023. – Vol. 141. – P. 100930.