

MODELING OF DROPLET EVAPORATION KINETICS IN AIR-PLASMA TREATMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL REPROCESSING WASTES

Y. Ghoneim^{a,b,1}, A. G. Karengin^{a,2}, A. A. Karengin^{c,3}, I. Yu. Novoselov^{a,4}

^a National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

^b Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia

^c Siberian Chemical Combine, Seversk, 636039, Russia

A mathematical model is formulated to describe the plasma treatment of spent nuclear fuel (SNF) reprocessing wastes, which are fed into an air-plasma flow as dispersed aqueous-salt-organic compositions (ASOCs) containing ethanol or acetone as organic additives. The model describes the coupled kinetics of droplet heating and evaporation, interphase momentum exchange, and heat and mass transfer within a one-dimensional two-phase-flow framework, which is cast in dimensionless form to enable parametric analysis and scale-up. Thermochemical calculations are used to determine optimal ASOC formulations that provide an adiabatic combustion temperature of approximately 1500 K, thereby ensuring energetically efficient plasma operation and complete oxidation of the organic fraction. The influence of key operating parameters — initial plasma temperature and velocity, droplet size and injection velocity, and liquid-to-gas mass ratio — on the spatial extent of droplet evaporation is investigated numerically using a fourth-order Runge–Kutta integration scheme with controlled accuracy. The results show that, at temperatures above about 1500 K, the overall rate of plasma utilization is governed by solvent (water) evaporation, whereas further increases in inlet plasma temperature have only a weak effect on the length of the complete-evaporation zone. In contrast, droplet size and flow hydrodynamics exert a dominant influence: reducing the initial droplet diameter from 100 to 40 μm and decreasing the gas-flow velocity from 90 to 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ lead to multi-fold reductions of the evaporation length, allowing complete evaporation within reactor lengths not exceeding 1 m. The resulting model serves as a physically sound and computationally efficient means of forecasting and refining droplet-evaporation dynamics in air-plasma reactors designed for processing wastes from spent nuclear fuel reprocessing and other liquid radioactive waste streams.

Сформулирована математическая модель для описания плазменной обработки отходов переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которые подаются в поток воздушной плазмы в виде дисперсных водно-солеорганических композиций (ВСОК), содержащих этанол или ацетон в качестве органических добавок. Модель описывает совместную кинетику нагрева

¹E-mail: ghoneym@tpu.ru; youmnasami24@gmail.com

²E-mail: karengin@tpu.ru

³E-mail: karenginaleksey@gmail.com

⁴E-mail: inovoselov@tpu.ru

и испарения капель, межфазный обмен импульсом, а также тепло- и массообмен в рамках одномерного двухфазного потока. Модель представлена в безразмерном виде, что позволяет проводить параметрический анализ и масштабирование. С помощью термодимических расчетов были определены оптимальные составы ВСОК, обеспечивающие температуру адиабатического горения около 1500 К, что гарантирует энергетически эффективную работу плазмы и полное окисление органической фракции. Влияние основных рабочих параметров — начальной температуры и скорости плазмы, размера и скорости подачи капель, а также массового соотношения жидкости и газа — на пространственный масштаб испарения капель исследовано численно с использованием схемы интегрирования Рунге–Кутты четвертого порядка с контролируемой точностью. Результаты показывают, что при температуре выше 1500 К общая скорость использования плазмы определяется испарением растворителя (воды), в то время как дальнейшее повышение температуры поступающей плазмы оказывает лишь незначительное влияние на длину зоны полного испарения. В то же время размер капель и гидродинамика потока оказывают доминирующее влияние: уменьшение начального диаметра капель со 100 до 40 мкм и снижение скорости потока газа с 90 до 10 м·с⁻¹ приводят к многократному сокращению длины испарения, что позволяет полностью испарить капли в реакторе длиной не более 1 м. Полученная модель является физически обоснованным и эффективным с точки зрения вычислений способом прогнозирования и уточнения динамики испарения капель в воздушно-плазменных реакторах, предназначенных для переработки отходов ОЯТ и других жидких радиоактивных отходов.

PACS: 28.41.Ak; 28.41.Bm; 28.41.Kw; 28.50.—k

Received on February 18, 2026.