**УДК 526.3**

**СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ В НАНОЖИДКОСТИ (НЕЛИНЕЙНЫЙ ПОДХОД)**

**А.И. Ливашвили, П.В. Виноградова**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)

E-mail: livbru@mail.ru

*Получено точное решение системы нелинейных уравнений, описывающих нелинейную динамику концетрации наночастиц в жидкофазной среде, подверженной лазерному облучению. При этом, учитывается зависимость коэффициента теплопроводности от концентрации*

Стремительный прогресс в области нанотехнологий предоставил исследователям широкий арсенал новых материалов с уникальными оптическими и физико-химическими свойствами для применений в биологии и медицине [1-3] . К числу таких материалов относят коллоидные суспензии или, как сейчас их принято называть, наножидкости (при исследовании оптических свойств наножидкости принимается, что длина световой волны, которой её облучают, много больше размеров частиц), широко применяются в различных сферах нанотехнологии.

Не смотря на большое число публикаций по этой проблематике [4-9], многие вопросы, связанные с процессами переноса в наножидкостях, остаются невыясненными.

 Целью нашей работы является теоретическое исследование динамики концентрации

наночастиц в жидкофазной среде, подвергаемой лазерному облучению постоянной интенсивности. Коэффициент поглощения излучения принимаем постоянным. (рис.1)



*Рис.1*. Геометрия задачи

Запишем систему балансных уравнений теплопроводности и переноса массы (наночастиц) [10]:

|  |  |
| --- | --- |
| $$C\_{p}ρ\frac{∂T}{∂t}=div\left(λ\left(C\right)\vec{gradT}\right)+αI\_{0}$$ | (1) |
| $$\frac{∂C}{∂t}=div\left(D\vec{gradC}\right)+D\_{T}div\left(C\left(1-C\right)\vec{gradT}\right)-\overline{V}∙\vec{gradC}$$ | (2) |

где $T$ - температура среды, $С$ *-* объёмная концентрациясреды, $λ\left(С\right)$ - коэффициент теплопроводности среды*,* $ α$ *-* коэффициент поглощения световой волны, $I\_{0}$ - интенсивность падающего излучения $D$ - коэффициент диффузии наночастиц, $D\_{T}$ - коэффициент термодиффузии, $C\_{p},ρ$ - теплофизические постоянные: теплоёмкость и плотность среды соответственно.

Будем рассматривать одномерный случай, пренебрегая, ввиду его малости, эффектом Дюфура. Мы также не учитываем потоки, вызванные электрострикцией наночастиц. Динамику наночастиц будем изучать на фоне стационарной температуры среды - $\frac{∂T}{∂t}=0$ , что вп$олне оправдано , т.к. тепловые процессы устанвлваютя на два-три порядка бысрее диффузионных.$ Нас также будут интересовать процессы с $C $<< 1. Это неравенство гарантирует нам отсутствие процессов коагуляции (слипания) наночастиц.

 Согласно теоретическим и экспериментальным работам [11-12], концентрационную зависимость коэффициента теплопроводности среды при малых концентрациях можно считать линейной:

|  |  |
| --- | --- |
| $$λ\left(С\right)=λ\_{0}\left(1+pC\right),$$ | (3) |

где $λ\_{0}$ - значение коэффициента теплопроводности несущей жидкости (без наночастиц), параметр $p$ - линейный коэффициент. ( 0 <*p*< 1).

Учитывая стационарный температурный режим, равенство (3) и малую концентрацию, из уравнения теплопроводности получим:

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{∂^{2}T}{∂x^{2}}=-\frac{∝}{λ\_{0}\left(1+pC\right)}I\_{0}≈-\frac{α}{λ\_{0}}I\_{0}\left(1-pC\right). \left(pC<<1\right)$$ | (4) |

Для дальнейшего математического упрощения задачи, в диффузионном уравнении (2) будем пренебрегать слагаемым, которое пропорционально $ ∇\left[C(1-C)\right]∇T$ . Дело в том, что сравнительная оценка этого выражения со слагаемым типа $С(1-C)∇^{2}T$ даёт следующие результаты: в случае освещения наножидкости излучением с гауссовым профилем интенсивности неравенство

$$ \left|С(1-С)∇T \right|\leq \left|С(1-C)∇^{2}T\right|$$

доказывается прямым вычислением, а при равномерно распределённой интенсивности даже грубые оценки показывают, что левая часть этого неравенства не превосходит правую.

Используя приближение (4), уравнение для концентрации (2) можно записать в виде

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{∂C}{∂t}=D\frac{∂^{2}C}{∂x^{2}}-\frac{DS\_{T}∝I\_{0}}{λ\_{0}}\left(1-pC\right)\left(1-C\right)C$$ | (5) |

где $S\_{T}=\frac{D\_{T}}{D}$ – коэффициент Соре.

Введём безразмерные переменные: τ= $\frac{DS\_{T}∝I\_{0}}{λ\_{0}}t$, y= $\left(\frac{S\_{T}∝I\_{0}}{λ\_{0}}\right)^{\frac{1}{2}}$*x*.

Тогда уравнение (5) примет вид

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{∂C}{∂τ}=\frac{∂^{2}C}{∂y^{2}} -\left(1-pC\right)\left(1-C\right)C$$ | (6) |

Полученное уравнение известно как уравнение реакции диффузии Доказано ], что при непрерывности однородного слагаемого уравнение (6) имеет частное автомодельное решение в виде бегущей волны.

Уравнение (6) имеет однородные решения: $C\_{1}=0, C\_{2}$=1/p, $C\_{3}=1.$ ( *p* >1)

Для нахождения явного вида решения воспользуемся подстановкой Коула=Хопфа [ ]:

|  |  |
| --- | --- |
| $$C\left(y,τ\right)=\frac{W\_{y}^{'}}{W}∙μ, W=W\left(y,τ\right)$$ | (7) |

Подставляя (7) в уравнение (6), получим систему переопределённых уравнений относительно функций $W\left(y,τ\right),$ решая которую и используя (7), получим частное решение уравнения (6)) :

|  |  |
| --- | --- |
| $$C\left(y,τ\right)=\sqrt{2}\frac{Aexp\left[\left(3k\_{1 }^{2} - k\_{1}\left(1+p\right)\right)τ+k\_{1 }y\right]+Bexp[ \left(3k\_{2}^{2} - k\_{2}\left(1+p\right)\right)τ+k\_{2 }y]}{Mexp\left[\left(3k\_{1 }^{2} - k\_{1}\left(1+p\right)\right)τ+k\_{1 }y\right]+Nexp\left[ \left(3k\_{2}^{2} - k\_{2}\left(1+p\right)\right)τ+k\_{2}y\right]+G}$$ | (8) |

где: $k\_{1,2}$ = $\frac{1 }{2}(1\pm \sqrt{5 )}.$

Таким образом, мы получили « двухфазное » решение , которое описывает автоволну с неизменяющимся профилем фронта (кинк) (рис.2). Постоянные в решении могут быть определены из начальных условий. Заметим, что наличие в знаменателе постоянной G приводит к появлению особенности в решении (8).



|  |  |
| --- | --- |
| *Рис.2* Профили решения (8) при различных значениях параметров |  |

 Возвращаясь к уравнению (5), подчеркнём тот факт , что при его получении мы предпологали протекание процессов с нормальной термодиффузией.

$$ Рассмотрение случая с аномальной привоит к тому, что выражениедля концентрации $$

становится комплекснозначным,что приводит к потере его физического смысла. Очевидно, требуется дополнительное изучение этого вопроса.

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1**.** Рудяк, В.Я. Современные проблемы микро- и нанофлюидики // В.Я. Рудяк, А.В. Минаков. –Новосибирск: Наука, 2016. – С.296

2. Nadeem Baig,, Irshad Kammakakam and Wail Falath //. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges.// Materials Advances .- 2021.- 2.- P.1821 - 1871.

3. Kolahalam, A., Kasi Viswanath Review on nanomaterials: Synthesis and applica-tions.// Materials today. -2019. - Vol.18, part 6.- P.2182-2190.

4. Сироткина, А.Л., Федорович, Е.Д., Перспективы использования наножидкостей в системах отвода тепла в авариях, c плавлением активной зоны // Глобальная ядерная безопасность. №2. - .2017.- Cc.81-88c

5. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Эффект Дюфура в дисперсной жидкофазной среде в поле гауссова пучка // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В. М. Самсонова, – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып.5. –С. 116-119

6. Livashvili A. I ., Krishtop,V. V., Bryukhanova,T., N.,. Kostina , G.,V.Concentration dynamics of nanopar-ticles under a periodic light field . // Physics Procedia. - 2015. 73.- P.156 – 158

7. Abram I. Livashvili, Victor V. Krishtop, Polina V. Vinogradova, Yuriy M. Karpets, Vyacheslav G. Efremenko , Alexander V. Syuy ,. and Pavel V. Igumnov. Appearance of a Solitary Wave Particle Concentration in Nanofluids under a Light Field/ // Nanomaterials. – 2021.- 11.- P. 1291

8. Smorodin В. L, Cherepanov L.N. Myznikova B. I, ShliomisM.I. Traveling-wave convection in colloids stratified by gravity. // Physical Review, E. - 2011.- Vol. 84.- P. 026305

9. Livashvili.A,I , Krishtop, V,V. Vinogradova P.V., Kostina G. V., Bryukhanova T. N. Dynamics of nanoparticle concentration in nanofluids under laser light field// A I 1, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. - 2017. Series 936. – P.012079 Article ID

10. Гроот С. Де, Мазур П. Динамика необратимых процессов. –Москва.- Мир. –C.1968.-456 .

11.Черепанов И.Н., Попов В. А. Экспериментальное исследование влияния концентрации на параметры нано-жидкости. // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. -2017. - Вып. 2. (36).- С. 26–31.

12.Черепанов И.Н, Смородин Б.Л. О влиянии концентрационной зависимости вязкости на конвективную неустой-чивость горизонтального слоя коллоидного раствора // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. - 2019. Вып. 1. (36). - С. 26–30