

ПЕРМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ПЕРМСКИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

Сборник статей по материалам
IX Всероссийской конференции,
посвященной памяти профессоров
Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого
и Д. В. Любимова



Пермь 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД
Уральского отделения Российской академии наук» –
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

ПЕРМСКИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

**Сборник статей по материалам
IX Всероссийской конференции,
посвященной памяти профессоров
Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова**

(г. Пермь, ПГНИУ, 4–6 октября 2023 г.)



Пермь 2023

УДК 532.5
ББК 22.25
П275

Пермские гидродинамические научные чтения [Электронный ресурс] : сборник статей по материалам IX Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова / отв. ред. Т. П. Любимова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2023. – 27,1 Мб ; 470 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/permskie-gidrodinamicheskie-nauchnyechteniya-2023.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-4066-9

Представлены статьи по материалам IX Всероссийской конференции, проходившей на базе Пермского государственного национального исследовательского университета 4 – 6 октября 2023 г. Конференция посвящена памяти руководителей Пермской гидродинамической научной школы – ведущей научной школы Российской Федерации – профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова.

Тематика сборника охватывает широкий спектр актуальных исследований в области физической гидродинамики, перспективных материалов и технологий, физики мягких конденсированных сред.

Издание предназначено для научных работников, аспирантов и студентов естественнонаучных специальностей вузов.

УДК 532.5
ББК 22.25

*Издается по решению ученого совета физического факультета
Пермского государственного национального исследовательского университета*

Рецензенты

- Кривилев М. Д.** – д. ф.-м. н., доцент, заведующий лабораторией физики конденсированных сред Удмуртского государственного университета, г. Ижевск;
- Баяндин Д. В.** – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь

ISBN 978-5-7944-4066-9

© ПГНИУ, 2023

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ОБТЕКАНИИ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЧОХРАЛЬСКОГО

Н. А. Вerezуб, А. И. Простомолотов
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
119526, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 1

Целью данной работы является детальное изучение процессов конвективного теплопереноса и кристаллизации на простой, но единой расчетно-экспериментальной модели кристаллизации веществ с температурами плавления близкими к комнатным (гептадекан) методом Чохральского. Прозрачность расплава гептадекана позволила визуализировать как структуры самого течения расплава, так и его закристаллизовавшейся части в лабораторном эксперименте, что обеспечило расчетную модель данными для тестирования. Численные расчеты позволили провести параметрическое изучение структур течения, тепловых потоков на охлаждаемом диске и определить зависимость формы фронта кристаллизации этого вещества от режимов конвективного теплообмена: термогравитационной и смешанной (т.е. при дополнительном вращении кристалла) конвекции.

Ключевые слова: рост кристалла; гидродинамика; моделирование

HYDRODYNAMIC INSTABILITY DURING THE FLOW AROUND CRYSTALLIZATION FRONT IN CZOCHRALSKI PROCESS

N. A. Verezub, A. I. Prostomolotov
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
119526, Moscow, Vernadskogo ave., 101-1

The aim of this work is detailed study of convective heat transfer and Czochralski crystallization in a simple, but a common computational-experimental model describing the crystallization in a molten metal and organic substances having the melting points close to room temperature (heptadecane). A transparency of molten heptadecane allows the visualizing its flow structure and also a shape of its crystallized portion in the laboratory model that provided by an experimental data the calculating model for numerical verification. Numerical calculations allowed the parametric investigating the flow structure and heat fluxes on the cooled crystal (disk) and establishing the dependence of a shape of liquid-solid interface for this substance upon the convective heat transfer modes: thermal gravitational and mixed (i.e. with additional crystal rotation) convection.

Keywords: crystal growth; hydrodynamics; modeling

1. Математическая постановка задачи

Прозрачность расплава гептадекана позволила визуализировать как структуры самого течения расплава, так и его закристаллизовавшейся части в лабораторном эксперименте [1], что обеспечило расчетную модель данными для тестирования. Численные расчеты позволили провести параметрическое изучение

структур течения, тепловых потоков на охлаждаемом диске и определить зависимость формы фронта кристаллизации (ФК) от режимов конвективного теплообмена.

Математическая модель показана на рис. 1: расплавленное состояние материала (1) обеспечивается нагревом боковой стенки тигля (4) до температуры $T_W > T_M$. Дно тигля (5) и свободная поверхность расплава (7) предполагаются теплоизолированными. На всей поверхности охлаждаемого диска (6) поддерживается температура $T_S < T_M$. Диск может вращаться со скоростью Ω_S , на расплав действует сила тяжести g . Охлаждение диска приводит к кристаллизации расплавленного материала с образованием затвердевшей области (2).

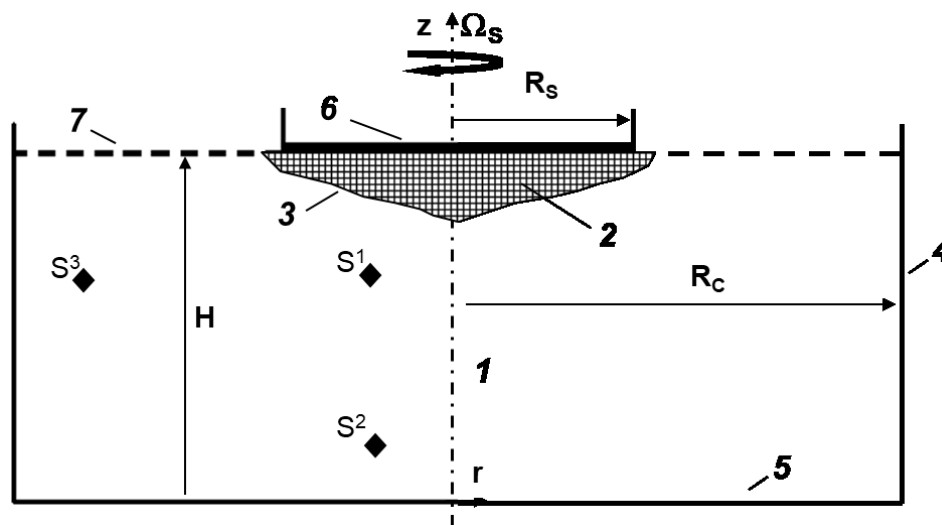


Рис. 1. Схема математической модели

Модель включает цилиндрический тигель ($R_C = 0.1475$ м, $H = 0.1032$ м; $H/R_C = 0.7$), заполненный расплавом, который частично закрыт сверху соосным диском ($R_S = 0.0536$ м; $R_C/R_S = 2.75$). Модель дополнена датчиками температуры ($z \times r$) [м]: $S^1 - (0.0516, 0.0134)$; $S^2 - (0.0516, 0.1425)$; $S^3 - (0.005, 0.0134)$. Предполагается, что между кристаллом (твёрдой фракцией) и расплавом (жидкой фракцией) существует область кристаллизации при значениях температуры, больших температуры солидуса T_{SOL} и меньших температуры ликвидуса T_{LIQ} , в которой задается линейное изменение доли жидкой фракции посредством коэффициента $\beta = (T - T_{SOL}) / (T_{LIQ} - T_{SOL})$.

Изучается форма ФК (3) в зависимости от режимов тепловой конвекции, изменяемых с помощью задания конкретных значений температуры (T_W , T_S) и скорости вращения диска Ω_S . Для конкретного материала задается температура кристаллизации T_M , близкая к комнатной (гептадекан: $T_M = 295$ К). Теплофизические параметры материалов взяты из справочника [2].

2. Влияние конвективных потоков на форму ФК

Нагрев боковой стенки тигля вызывает в гравитационном поле g тепловую конвекцию, при которой нагреваемый расплав движется вверх вдоль этой стенки и далее к охлаждаемому диску. Это движение усиливается действием термокапиллярных сил на свободной поверхности расплава. Вблизи диска происходит

кристаллизация расплава с образованием твердой фракции (2) (см. рис. 1), объем и форма которой зависит от режима конвекции.

В лабораторном эксперименте [1] был рассмотрен режим тепловой конвекции в гептадекане при следующих задаваемых температурах: на диске – $T_S = 292.53$ К, на боковой стенке – $T_W = 295.9$ К, который был использован в данной работе для верификации результатов моделирования.

В результате расчетов было зафиксировано одновихревое стационарное течение, показанное на рис. 2. Модуль скорости достигает максимума $V_m = 1.01 \times 10^{-2}$ м/с в опускном течении вблизи оси. Однако подъемное течение вблизи боковой стенки тигля происходит существенно медленнее ($V_m \approx 5.1 \times 10^{-4}$ м/с).

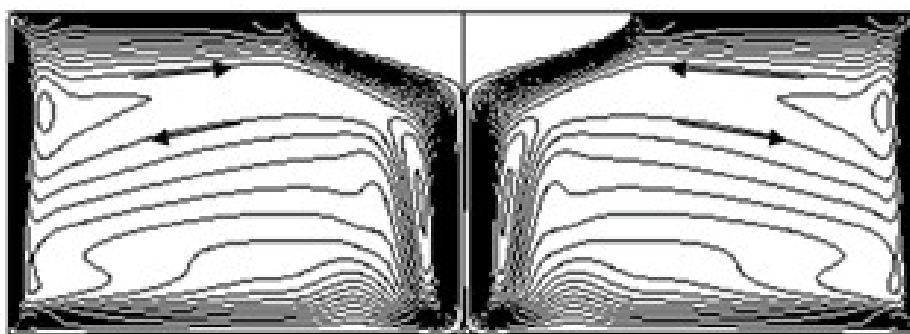


Рис. 2. Стационарная структура линий тока при тепловой конвекции в гептадекане ($T_S = 292.53$ К, $T_W = 295.9$ К)

Возникает вертикальная стратификация температурного поля, характеризующаяся радиальной температурной однородностью и тем, что верхние приповерхностные слои расплава значительно более прогреты, чем его придонные слои. Основная неоднородность температурного поля возникает в подкристальной области, где охлаждающийся расплав стекает вниз вдоль ФК. Расчетная форма ФК, представленная изотермой T_{SOL} (рис. 3), и экспериментальная форма закристаллизовавшейся области [1] хорошо между собой согласуются.

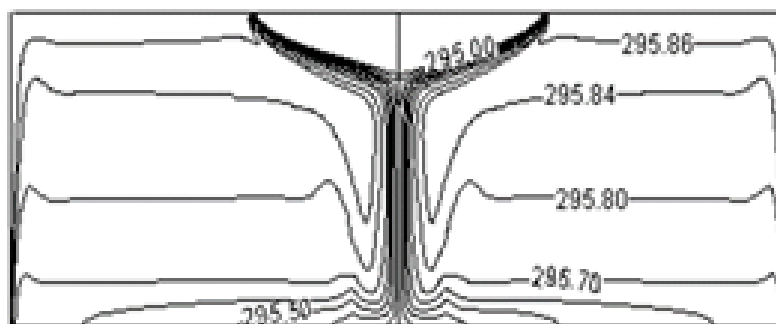


Рис. 3. Стационарная структура изотерм в гептадекане при тепловой конвекции ($T_S = 292.53$ К, $T_W = 295.9$ К)

Заметное влияние оказывает вращение диска, создающее встречное подъемное течение в центре тигля. На мгновенной картине изотерм в расплаве, показанной на рис. 3а, можно видеть момент отрыва термиков от ФК ($T_M = 295$ К) на

фоне устойчивой вертикальной температурной стратификации вне подкристальной области (см. изменение температуры по вертикали от 295.71 до 295.84 К). Такое течение способствует изменению формы ФК на вогнутую в центре ФК (см. рис. 4).

Графики флуктуаций температуры, зарегистрированные для двух датчиков S^1 и S^2 , показанных на рис. 1, приведены на рис. 5 Датчик S^1 , расположенный вблизи ФК, зафиксировал значительные колебания температуры, но в более отдаленном датчике S^2 они меньше. Заметим, что вблизи боковой стенки тигля (датчик S^3 на рис. 1) колебания температуры практически отсутствуют.

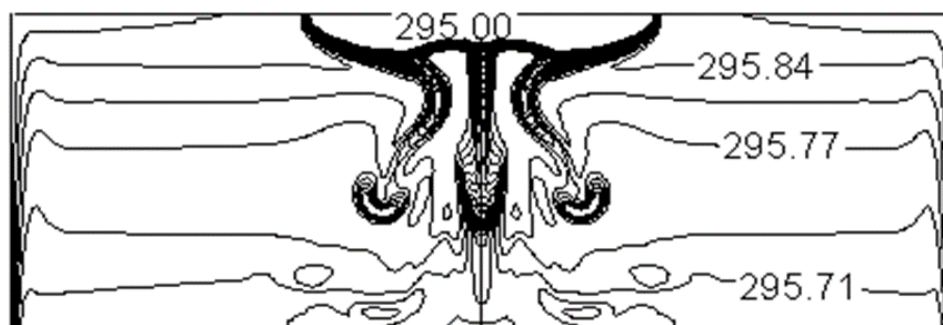


Рис. 4. Нестационарная структура изотерм в гептадекане при тепловой конвекции и вращении диска ($\Omega_S = 1$ рад/с)

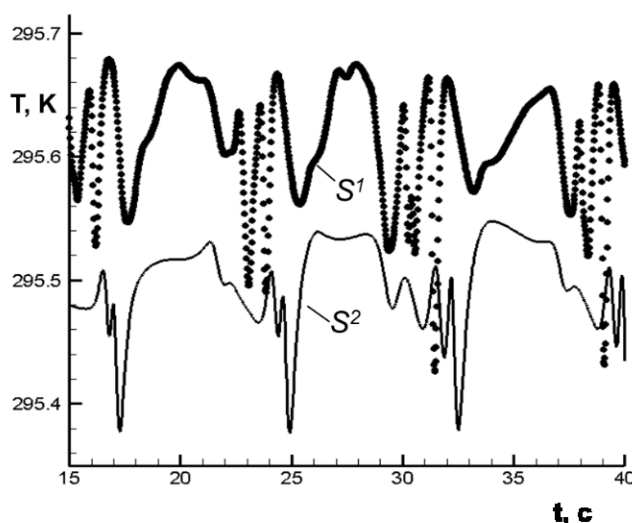


Рис. 5. Графики флуктуаций температуры, зарегистрированные датчиками S^1 и S^2 при тепловой конвекции и вращении диска ($\Omega_S = 1$ рад/с)

Работа выполнена по теме госзадания ИПМех РАН (№ госрегистрации 123021700045-7).

Список литературы

1. Бердников В. С., Винокуров В. А., Винокуров В. В. и др. Общие закономерности конвективного теплообмена в системе тигель-расплав-кристалл в методе Чохральского и их влияние на формы фронта кристаллизации // Вестник НГУ им. Лобачевского. МЖГ. 2011. № 4(3). С. 641–643.
2. Бабичев А.П. и др. Физические величины. Спр. М.: Энергоиздат, 1991, 1232 с.