

**Распределение компонентов бинарного металлического расплава при
выдержке в капиллярах сложной формы**

Н.П. Углеv¹, С.Н. Углеv²

¹ФГАОУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29

²ООО «Информационные технологии-Поволжье»
614016, Россия, Пермь, Куйбышева, 47

Ouglev@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.221

Аннотация: Приведены результаты нескольких различающихся экспериментов по исследованию процесса расслоения и диффузии компонентов бинарного металлического расплава олово-свинец, находящегося в «капиллярах» из не смачиваемого материала сложной формы. Процесс диффузии изучали при непосредственном взаимном растворении чистых исходных компонентов из состояния «свинец внизу, олово – сверху» в ячейках, позволяющих атомам свинца распространяться как вверх, так и вниз в объеме жидкого олова. Эксперимент по «расслоению» проводили в плоском капилляре с включенным внутренним дефектом, позволившем создать в нижней части широкой грани образца поперечную каверну глубиной до 0,5 мм, перекрывающую полностью ширину одной из плоскостей образца. Количественный анализ состава образцов проводили рентгено-флуоресцентным методом по заранее построенной калибровочной шкале. Результаты экспериментов позволили выявить в металлическом расплаве, помимо диффузии, существование второго механизма массопереноса, заключающегося в течении свинца по границе между жидким образцом и не смачиваемой стенкой «капилляра». Результаты экспериментов по диффузии полностью соответствуют данными по расслоению в плоском капилляре, а также ранее проведенным исследованиям.

Ключевые слова: *металлический расплав, расслоение, диффузия, второй механизм массопереноса в металлических расплавах, межфазное течение.*

Углеv Николай Павлович – к.х.н., доцент кафедры «Химические технологии» ФГАОУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Углеv Сергей Николаевич – генеральный директор ООО «Информационные технологии-Поволжье»

Original paper

Distribution of components of binary metal melt during exposure in capillaries of complex shape

N.P. Uglev¹, S.N. Uglev²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

²LLC «Information Technologies-Volga region», Perm, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.221

Abstract: The results of several different experiments on the study of the process of stratification and diffusion of components of a binary tin-lead metal melt located in «capillaries» of a non-wettable material and complex shape are presented. The diffusion process was studied with the direct mutual dissolution of pure initial components from the «lead below, tin above» state in cells that allow lead atoms to spread both upward and downward in the volume of liquid tin. The «stratification» experiment was carried out in a flat capillary with an internal defect included, which made it possible to create a transverse cavity up to 0,5 mm deep in the lower part of the wide face of the sample, completely overlapping the width of one of the sample planes. The quantitative analysis of the composition of the samples was carried out by the X-ray-fluorescence method according to a pre-constructed calibration scale. In the metal melt, experimental results made it possible to reveal the existence of a second mass transfer mechanism, in addition to diffusion, consisting in the flow of lead along the boundary between the liquid sample and the non-wettable wall of the «capillary». The results of the diffusion experiments fully correspond to the data on stratification in a planar capillary, as well as to previous studies.

Keywords: metal melt, stratification, diffusion, second mechanism of mass transfer in metal melts, interfacial flow.

Nikolai P. Uglev – Ph. D., Associate Professor, Chemical technology Department, Perm National Research Polytechnic University, ORCID: 0000-0001-7560-0842.

Sergei N. Uglev – General Director, LLC «Information Technologies-Volga region», ORCID: 0009-0004-4724-7761.

Поступила в редакцию/received: 01.07.2025; после рецензирования/reviised: 29.08.2025; принята/accepted 02.09.2025.

1. Введение

Известно, что бинарные и более сложные металлические исходно однородные расплавы демонстрируют эффект неустойчивости состава по высоте, заключающийся в том, что тяжелые компоненты концентрируются в нижней части не смачиваемого капилляра, а легкие, наоборот, в его верхней части [1-4]. Наиболее важной особенностью этого эффекта является то, что предел частичного «расслоения» достигается за сравнительно короткое время (часы), и далее уже не изменяется, хотя зависит от высоты капилляра и температуры. Эксперимент проводится практически в изотермических условиях. Процесс расслоения начинается при начальном отсутствии перепада концентраций компонентов, и проходит сначала достаточно быстро, асимптотически затухая к концу эксперимента. «Движущей силой» этого процесса является разность химических потенциалов атомов, находящихся на разной высоте капилляра [5]. Считается, что достигнутое равновесное распределение компонентов расплава определяется барометрическим распределением кластеров компонентов, что является по сути одним из обоснований кластерной структуры жидкости [6-8]. От диффузии механизм процесса расслоения не зависит, поскольку её сначала нет. Диффузионный перенос компонентов расплава вдоль образца возникает только после появления некоторого расслоения и, в соответствии с известными уравнениями Фика, протекает все время, пока есть разница концентраций компонентов по высоте капилляра. Диффузия, таким образом, также протекает независимо от расслоения, поэтому в состоянии достигнутого динамического равновесия (после «расслоения») одновременно протекают оба процесса, и они могут протекать бесконечно долго и бездиссипативно: диффузия выравнивает концентрацию по высоте, а расслоение тут же всё возвращает обратно. Не вдаваясь в обсуждение предполагаемого механизма собственно расслоения, основанного на предположении о течении одноатомного межфазного слоя атомов, находящихся в особом квантовом состоянии, который имеет достаточно спорный характер [9, 10], обращаем внимание на то, что, если интегральный процесс «расслоения» изучен сравнительно подробно, то его составляющая – встречная диффузия – практически не исследована. Тем не менее, на основе вышеуказанного

механизма разработана методика определения коэффициентов диффузии в расплавах [11], демонстрирующая адекватные результаты. При этом следует учитывать, что механизмы массопереноса в жидкостях достоверно не установлены [12], хотя существует достаточно большое количество теорий диффузии, обзор которых представлен в коллективной работе [13]. В связи с этим, исследования процесса диффузии в металлических расплавах, протекающей в ячейках специальной формы, представляют как теоретический, так и практический интерес [14]. Анализ диффузионных процессов «в чистом виде» позволит оценить вклад этой составляющей в интегральный процесс расслоения и подтвердить вторую составляющую процесса, – собственно механизм расслоения, за счет «встречного течения атомов» в виде пленки одноатомной толщины по межфазной поверхности между стенкой капилляра и образцом расплава [9, 10].

2. Диффузия в U-образном капилляре

На рис. 1 представлены два варианта сложных капилляров, в которых отсутствует исходная стадия «расслоения», и диффузия выступает главным действующим началом. U-образный капилляр (см. рис. 1, I) выполнен в двух вариантах: короткий наклонный капилляр с высотой $H = 50$ мм, и длинный вертикальный капилляр, с высотой $H = 166$ мм. Устройство стеклянного (Pyrex) капилляра в виде перевернутой буквы «U» (внутренний диаметр 8 мм): 1 – балласт (кварцевый стержень). Введен для уменьшения сечения металлического образца с целью повышения чувствительности методики; 2 – устье диффузионного источника; 3 – внутренняя емкость (пробирка диаметром 3 мм и зона диффузионного мостика) со свинцом, припаяна в двух точках ко внутренней стенке внешнего капилляра; 4 – свинец; 5 – пробка; 6 – олово. Диффузионный мостик и весь свободный объем широкого капилляра заполнены оловом (без штриховки).

Эксперимент по взаимной диффузии чистых компонентов в сложном капилляре (см. рис. 1, I) заключается в следующем: При выдержке при температуре жидкого состояния для обоих компонентов (350°C) следует ожидать диффузию свинца (4) вверх по диффузионному мостику (3) через олово до устья (2) внутренней пробирки. Далее процесс диффузии свинца должен продолжиться во внешней среде олова в широком капилляре вверх и вниз от устья диффузионного источника. Производительность последнего определяется длиной и сечением диффузионного мостика, поэтому каждый из потоков во внешней среде, как вверх, так и вниз, – должен быть, как минимум, вдвое меньше потока в области (3), а концентрация свинца в начальный период эксперимента как в вверх, так и вниз должна соответствовать экспоненциально снижающейся зависимости

в обоих направлениях до установления равновесной концентрации во всем объеме расплава. Показано, что за 3 часа эксперимента по взаимному растворению олова и свинца распределение концентрации при близких условиях весьма далеко от равновесия. Однако, как показал эксперимент с U-образным капилляром (см. рис. 2), экспоненциальное распределение свинца подтверждается только для потока свинца вверх (для короткого наклонного капилляра это в интервале от 50 до 75 мм, правее пунктирной вертикальной линии, определяющей положение устья внутренней пробирки), в то время как поток вниз (по рис. 2 – влево от точки $H = 50$ мм) явно представляет собой простое течение потока жидкого свинца до самого дна капилляра, причем его интенсивность в десятки раз превышает диффузионный поток вверх.

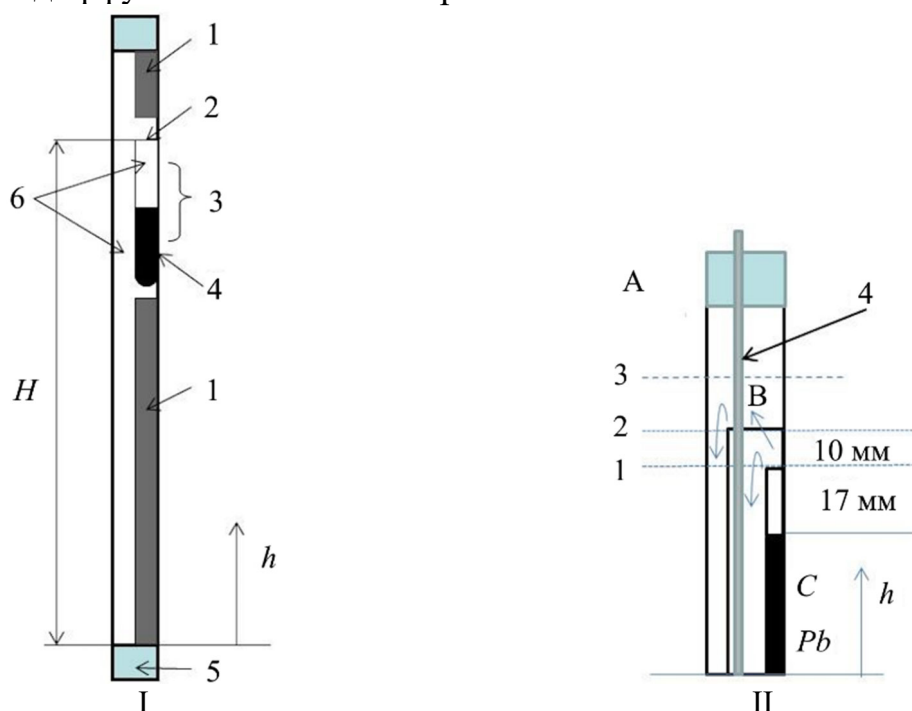


Рис. 1. Конструкция стеклянных ячеек для исследования процессов массопереноса компонентов металлического расплава.

При этом, в случае длинного капилляра, это соотношение, определяемое как отношение площадей под кривыми, увеличивается еще, как минимум, втрое (см. рис. 2, кривая 2), несмотря на увеличение длины диффузионного мостика практически на 27%. Очевидно, что незначительное изменение внешних условий диффузионного истечения свинца из источников никак не может столь существенно повлиять на их производительность. Следует отвергнуть и влияние конвекции на распределение свинца, которая неминуемо захватила бы жидкость и выше устья источника, и нарушила экспоненциальное распределение свинца выше устья (см. рис. 1, 2). Обращает на себя внимание, также, характер разброса экспериментальных точек для потока вниз: в то время как для

чисто диффузионного потока вверх разброса практически нет, для потока вниз разброс достаточно заметен.

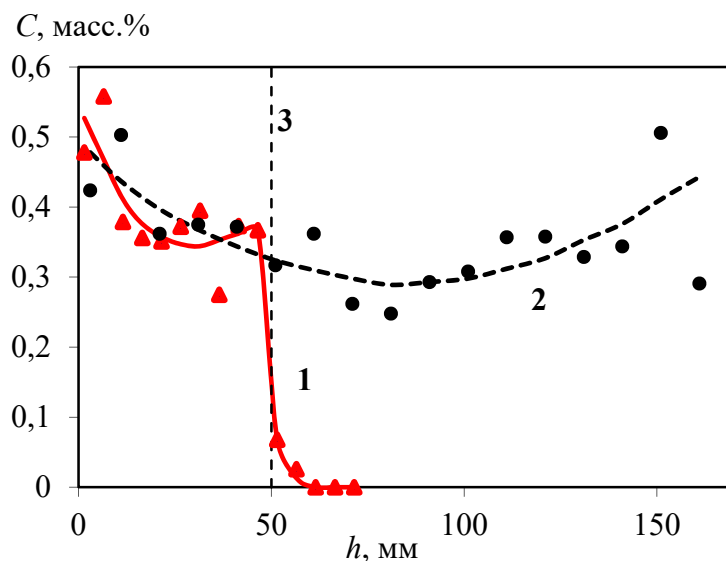


Рис. 2. Распределение концентрации свинца по длине U-образных капилляров. C – концентрация свинца, масс. %; h – высота от дна внешней емкости, мм; температура 350°C , длительность – 3 часа. 1 – треугольники, сплошная линия – короткий наклонный капилляр (45°), $H = 50$ мм; 2 – точки, пунктир – длинный вертикальный капилляр, $H = 166$ мм (только поток вниз). 3 – положение устья короткого капилляра; Длина диффузионного мостика для короткого (18 мм) и длинного капилляров (23 мм).

По нашему мнению, это связано с изменением механизма массопереноса – поток вниз явно имеет механизм, отличающийся от диффузионного, и связан со взаимодействием потока с поверхностью элементов конструкции ячейки. По-видимому, в данном случае истечение жидкого свинца протекает по способу прямого сифона, при этом пристенный межфазный поток начинается от поверхности жидкого свинца во внутренней узкой пробирке, преодолевает потенциальный гравитационный барьер 18 мм (длина мостика) и далее продолжается по внутренней и внешней стенке источника, поверхности балластного стержня и капилляра, до дна внешней емкости. Этот способ течения свинца подтверждается и для длинного вертикального капилляра (см. рис. 2). Отметим, что концентрация на дне капилляра больше, чем в области выхода потока свинца из устья диффузионного источника, что свидетельствует о натекании его на дно со скоростью, превышающей скорость диффузионного растворения в олове. Учитывая отсутствие конвекции, можно считать, что в эксперименте четко показана способность атомов свинца передвигаться в объеме расплава двумя принципиально различающимися способами. Аналогичная способность выявлена ранее и для атомов олова [15]. Существование выявленного эффекта может быть подтверждено сложным экспериментом, предусматривающем преодоление двух независимых гравитационных барьеров, представленном ниже.

3. Течение тяжелого компонента через два параллельно-последовательных потенциальных барьера различной высоты

Стеклянный U -образный капилляр B (см. рис. 1, II), аналогичный описанному выше, утоплен ниже уровня олова (пунктир (3)), во внешней кварцевой емкости (пробирке) A , и прижат к её дну с помощью тонкого вертикального кварцевого стержня (4). При перетекании из емкости C в B , атомам свинца приходится преодолевать гравитационный барьер высотой 17 мм от верхнего уровня свинца в емкости C до ее устья (линия 1), а при перетекании в емкость A высота барьера составляет уже 27 мм (линия 2), (см. рис. 1 II). Вследствие разницы в высоте гравитационных барьеров скорости перетекания заметно отличаются, однако существенно то, что динамическая концентрация свинца в нижних частях обеих приемных емкостей на момент измерения, так же, как и в случае предыдущего эксперимента, практически одинакова и составляет примерно 0,8 масс. % (см. рис. 3).

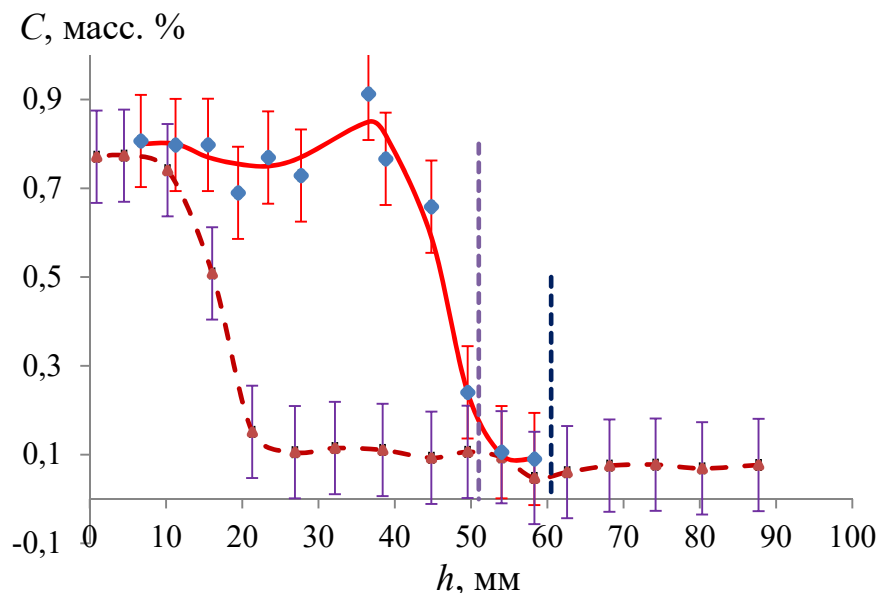


Рис. 3. Параллельно-последовательное течение свинца из диффузионного источника C в емкости B и A ; C – концентрация свинца, масс. %; h – высота от дна внешней емкости, мм; длительность 3 ч. 30 мин., 365°C. Левая вертикальная пунктирная линия указывает положение устья источника (пробирки со свинцом, C); правая вертикальная – устья пробирки B ; сплошная линия – зависимость концентрации свинца от высоты в емкости B ; пунктир – концентрация свинца от высоты в емкости A .

Характер распределения свинца указывает на последовательное заполнение емкостей B и A из-за их конкуренции при ограниченной производительности источника текущего свинца. Простая конвекция более тяжелого раствора свинца в олове, образующегося на выходе из устья источника C , во-первых, – отсутствует, поскольку низкая концентрация свинца ($\sim 0,1$ %) выше устья не «размыта» и четко фиксируется, во-вторых,

– так же, как и диффузия, не может объяснить эффект одновременного заполнения двух параллельных емкостей (см. концентрацию на дне емкости A), поскольку объем B на данный текущий момент времени эксперимента еще не заполнен (см. рис. 3).

Таким образом, оба эксперимента, представленных выше, подтверждают существование другого механизма массопереноса компонентов расплава, отличающегося от простой диффузии. Ранее, в работах [9, 16], было показано, что наиболее адекватный механизм расслоения может быть связан именно с предположением о течении атомов компонентов в тонком межфазном слое между расплавом и несмачиваемой стенкой капилляра. Это предположение проверено в специальном эксперименте, представленном в следующем разделе.

4. Расслоение компонентов в плоском вертикальном капилляре

Методика эксперимента заключалась в следующем: образец расплава олова (57,3 масс. %) со свинцом, близкого к эвтектическому составу (100×4,5×2 мм), выдерживали в плоском стеклянном капилляре вертикально 2 часа при температуре 225°C, после чего быстро охлаждали в горизонтальном положении до застывания. Особенностью образца в данном эксперименте являлось наличие большой поперечной каверны (канавки) глубиной до 0,5 мм по всей ширине одной плоской грани на высоте около 27 мм (между точками № 3 и № 4, считая снизу), существовавшей и в жидком состоянии.

Измерение концентрации олова на поверхностях плоского образца проводили рентгено-флюоресцентным методом на приборе Elvax с погрешностью по олову 0,13%. Особенностью этого метода анализа является то, что толщина слоя замера концентрации не превышает 3 микрона от поверхности образца. После обследования поверхностной концентрации, металлический стержень разрезали на короткие фрагменты, проводили их переплавку и тщательное перемешивание в микро тигле, готовили тонкие плоские образцы при выплескивании расплава на холодный стальной блок, и тем же методом определяли усредненную объемную концентрацию компонентов; точно так же, как и во всех остальных экспериментах представленных выше.

Полученное сложное распределение олова на противоположной от каверны бездефектной (гладкой) стороне образца (см. рис. 4), может быть связано, по нашему мнению, только с поверхностным механизмом расслоения компонентов: при движении снизу вверх межфазный поток атомов олова упирается в каверну, создавая гидравлический подпор, и начинает обтекать ее по противоположной гладкой стороне. При этом олово накапливается в объеме прилегающего тонкого слоя образца за счет

торможения потока, и диффузии его в объём образца. Учитывая ограниченную пропускную способность тонкого межфазного слоя, в области каверны возникает повышенная концентрация олова, которая, в идеале, должна иметь гладкое, куполообразное распределение по высоте капилляра, представленное на рис. 4 в виде точечного пунктира.

Выше каверны олово продолжает свободно течь в верхнюю часть образца. Однако, длядвигающегося сверху свинца, каверна также представляет препятствие, и он также обтекает её по противоположной стенке образца, так что в целом в зоне встречи потоков концентрация компонентов должна быть близка к аддитивной для данного сечения. Но объёмная доля свинца в два раза меньше, чем олова, поэтому он компенсирует повышение концентрации олова только в ограниченном объёме образца – в зоне пересечения потоков, что вызывает появление провала концентрации олова в этом месте. Основным результатом эксперимента является выявление факта значительного увеличения концентрации олова (до 60,1 масс. %) в области уменьшения поперечного периметра течения потока (из-за каверны), превышающее её максимальное усредненное значение даже вверху капилляра (59,17 масс. % при $h = 95$ мм) после завершения процесса расслоения. Очевидно, что чисто диффузионные процессы не в состоянии создать повышение концентрации в области каверны, и эффект может быть объяснен только наличием гидравлического подпора по высоте текущей пленки олова и свинца, и способностью их перехода в объём образца и обратно [10].

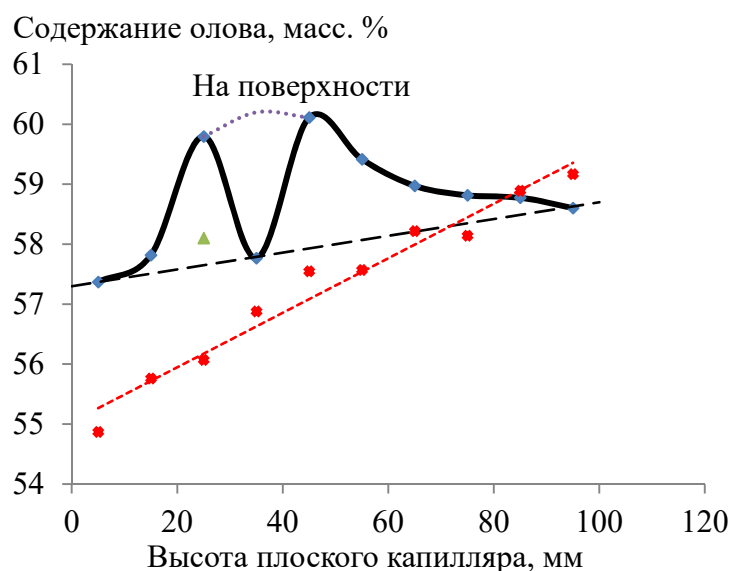


Рис. 4. Расслоение сплава $Sn + Pb$ в плоском вертикальном капилляре. Ромбики, сплошная линия, – концентрация олова на гладкой поверхности капилляра; треугольник - концентрация олова на стороне с каверной; крестики – тот же образец после усреднения составов фрагментов (переплавки).

5. Заключение

Результаты специальных экспериментов со сложными капиллярами подтверждают существование в бинарном металлическом расплаве второго механизма массопереноса, отличающегося от диффузии. Наиболее вероятным механизмом массопереноса является поверхностное течение компонентов по межфазной пленке между расплавом и стенкой капилляра.

Исследования выполнены с использованием научного оборудования «Центра наукоёмких химических технологий и физико-химических исследований» ФГАОУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» в соответствии с проектом Пермского НОЦ «Рациональное недропользование» (RFMEFI62120X0038).

Библиографический список:

1. **Гаврилин, И.В.** О ликвации в жидких эвтектических сплавах / И.В. Гаврилин, Т.Б. Фролова, В.П. Захаров // Известия АН СССР. Металлы. – 1984. – № 3. – С. 191-193.
2. **Гаврилин, И.В.** Седиментационный эксперимент при изучении жидких сплавов / И.В. Гаврилин // Известия АН СССР. Металлы. – 1985. – № 2. – С. 66-73.
3. **Бунин, К.П.** К вопросу о строении металлических эвтектических расплавов / К.П. Бунин // Известия АН СССР ОТН. – 1946. – № 2. – С. 305-310.
4. **Корсунский, В.И.** О влиянии центрифугирования на гетерогенное строение металлических расплавов эвтектического типа / В.И. Корсунский, Ю.И. Наберухин // Известия АН СССР. Металлы. – 1973. – № 5. – С. 182-187.
5. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика. Т. 5. Статистическая физика. Часть 1. – Издание 5-е. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2001. – 616 с.
6. **Новохатский, И.А.** О появлении структурной микронеоднородности жидких металлов в поверхностных явлениях / И.А. Новохатский, В.З. Кисунько, Ю.Г. Мороз, А.Г. Мелак // Журнал физической химии. – 1986. – Т. 60. – № 9. – С. 2256-2261.
7. **Kumar, R.** Clusters in liquid metals / R. Kumar // Contemporary Physics. – 1969. – V. 10. – I. 1. – P. 49-58. DOI: 10.1080/00107516908204562.
8. **Вертман, А.А.** К проблеме металлических расплавов / А.А. Вертман // В кн. Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов: памяти академика А.М. Самарина; под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Академкнига, 2002. – С. 207-214.
9. **Углев, Н.П.** Сверхтекучесть на межфазной границе жидкого металла и твердого тела / Н.П. Углев, С.Н. Углев // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 503-512.
10. **Углев, Н.П.** Дифференциальный эксперимент при изучении диффузии свинца в жидком олове / Н.П. Углев, С.Н. Углев // Журнал физической химии. – 2023. – Т. 97. – № 11. – С. 1573-1578. DOI: 10.31857/S0044453723110328.
11. **Углев, Н.П.** Прямое и «обратное» расслоение бинарных металлических расплавов в капиллярах / Н.П. Углев, Н.С. Бусов, С.Н. Углев // Расплавы. – 2021. – № 2. – С. 137-145. DOI: DOI: 10.31857/S0235010621020080.
12. **Павлов, В.В.** О «кризисе» кинетической теории жидкости и затвердевания (необходимое изменение традиционной молекулярной модели жидкости и твердого тела) / В.В. Павлов. – Екатеринбург, УПГА, 1997. – 392 с.
13. **Денисов, В.М.** Алюминий и его сплавы в жидком состоянии / В.М. Денисов, В.В. Пингин, Л.Т. Антонова и др. – Екатеринбург, УрО РАН, 2005. – 265 с.
14. **Бейлин, А.Ю.** О строении чистых жидкостей и механизме их формирования при плавлении / А.Ю. Бейлин // Башкирский химический журнал. – 2001. – Т. 8. – № 2. – С. 23-31.
15. **Углев, Н.П.** Исследование механизма расслоения металлических расплавов в капиллярах специальной формы / Н.П. Углев // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – № 13. – С. 7-12.
16. **Углев, Н.П.** Механизм частичного расслоения металлических расплавов в капиллярах / Н.П. Углев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2013. – Вып. 5. – С. 343-352.

References:

1. Gavrilin I.V., Frolova T.B., Zakharov V.P. O likvatsii v zhidkikh evtekticheskikh splavakh [On liquation in liquid eutectic alloys], *Izvestiya AN SSSR. Seriya Metally* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals], 1984, no. 3, pp. 191-193. (In Russian).
2. Gavrilin I.V. Sedimentatsionnyj eksperiment pri izuchenii zhidkikh splavov [Sedimentation experiment in the study of liquid alloys], *Izvestiya AN SSSR. Seriya Metally* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals], 1985, no. 2, pp. 66-73. (In Russian).
3. Bunin K.P. K voprosu o stroenii metallicheskih evtekticheskikh rasplavakh [On the structure of metallic eutectic melts], *Izvestiya AN SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Department of Technical Sciences], 1946, no. 2, pp. 305-310. (In Russian).
4. Korsunskij V.I., Naberukhin Yu.I. O vliyanii tsentrifugirovaniya na geterogennoe stroenie metallicheskih rasplavov evtekticheskogo tipa [On the influence of centrifugation on the heterogeneous structure of eutectic metal melts], *Izvestiya AN SSSR. Seriya Metally* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals], 1973, no. 5, pp. 182-187. (In Russian).
5. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika, Tom V. Statisticheskaya fizika, Chast' 1* [Theoretical Physics, vol. 5: Statistical Physics, Part 1], 5th ed. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, 616 p. (In Russian).
6. Novokhatsky I.A. O poyavlenii strukturnoj mikroneodnorodnosti zhidkikh metallov v poverkhnostnykh yavleniyakh [On the emergence of structural microheterogeneity of liquid metals in surface phenomena], *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry A], 1986, vol. 60, no. 9, pp. 2256-2261. (In Russian).
7. Kumar R. Clusters in liquid metals, *Contemporary Physics*, 1969, vol. 10, issue 1, pp. 49-58. DOI: 10.1080/00107516908204562.
8. Vertman A.A. K probleme metallicheskih rasplavov [On the problem of metal melts], *Fundamental'nye issledovaniya fizikokhimii metallicheskih rasplavov: pamyati akademika A.M. Samarina* [Fundamental research on the physicochemistry of metallic melts: in memory of academician A.M. Samarin], ed. dy N.P. Lyakishev. Moscow, Akademkniga Publ., 2002, pp. 207-214. (In Russian).
9. Uglev N.P., Uglev S.N. Sverkhtekuchest' na mezhfaznoj granitse zhidkogo metalla i tverdogo tela [Superfluidity at the interface between a liquid metal and a solid], *Kondensirovannye Sredy i Mezhfaznye Granitsy* [Condensed Matter and Interphases], 2014, vol. 16, no. 4, pp. 503-512. (In Russian).
10. Uglev N.P., Uglev S.N. Differential experiment to study the diffusion of lead in liquid tin, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2023, vol. 97, issue 11, pp. 2379-2383. DOI: 10.1134/S0036024423110328.
11. Uglev N.P., Busov N.S., Uglev S.N. Pryamoe i «obratnoe» rassloenie binarnykh metallicheskih rasplavov v kapillyarakh [Direct and «reverse» stratification of binary metal melts in capillaries], *Rasplavy* [Melts], 2021, no. 2, pp. 137-145. (In Russian).
12. Pavlov V.V. O «krisise» kineticheskoy teorii zhidkosti i zatverdevaniya (neobkhodimoe izmenenie traditsionnoj molekulyarnoy modeli zhidkosti i tverdogo tela) [On the «crisis» of the kinetic theory of liquid and solidification (a necessary change in the traditional molecular model of liquid and solid)]. Ekaterinburg, Ural State Mining and Geological Academy Publ., 1997, 392 p. (In Russian).
13. Denisov V.M., Pingin V.V., Antonova L.T. et al. *Alyuminij i ego splavy v zhidkom sostoyanii* [Aluminum and its alloys in liquid state]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2005, 265 p. (In Russian).
14. Bejlin A.Yu. O stroenii chistykh zhidkostej i mekhanizme ikh formirovaniya pri plavlenii [On the structure of pure liquids and the mechanism of their formation during melting], *Bashkirskij khimicheskij zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2001. vol. 8, no. 2, pp. 23-31. (In Russian).
15. Uglev N.P. Issledovanie mekhanizma rassloeniya metallicheskih rasplavov v kapillyarakh spetsial'noj formy [Study of the mechanism of stratification of metal melts in capillaries of a special shape]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2012, no. 13, pp. 7-12. (In Russian).
16. Uglev N.P. Mekhanizm chastichnogo rassloeniya metallicheskih rasplavov v kapillyarakh [Mechanism of partial metal melt stratification in capillars], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2013, issue 5. pp. 343-352. (In Russian).