

ГИДРАВЛИКА

Г. А. ДАВТЯН, В. Г. АПНШТЕЙН,
 Р. В. ГРИГОРЯН, М. Г. АМАМЧЯН

СКОРОСТЬ НАЧАЛА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ НЕКОТОРЫХ
 ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В
 РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

В промышленности АрмССР широкое применение находят разнообразные зернистые материалы—корунд, поташ, перлит, алюмосиликатгель, стекло, шлак. Отличительной особенностью процессов, осуществляемых с участием этих материалов, является широкий диапазон температур—от умеренных [охлаждение и сепарирование высушенных зернистых материалов (безводный гранулированный поташ, зерно, кварцевый песок); сушка продуктов комплексной переработки нефелиновых сиенитов, предусмотренная на РГХК (метасиликаты натрия, калия, 1,5-водный поташ), при температурах 170—250°C] до высоких (вспучивание перлита при температурах процесса 850—950°C и т. д.) Многие из упомянутых процессов целесообразно проводить в псевдоожженном (кипящем) слое зернистого материала; в этом случае для расчета и проектирования технологической аппаратуры в первую очередь необходимо располагать таким важным параметром, как скорость начала псевдоожжения w_0 —верхняя граница существования неподвижного и нижняя граница псевдоожженного слоя.

Скорость начала псевдоожжения оценивают теоретически или определяют экспериментально. Независимия большого числа трудноучитываемых факторов несферичность частиц, широта фракционного состава,— достоверное значение w_0 может дать только опыт. Правильность применения имеющихся формул для приближенного расчета (особенно при повышенных температурах) должна быть подтверждена экспериментально.

В настоящей статье приведены результаты экспериментальной проверки имеющихся зависимостей.

В литературе [1] приводится множество формул для расчета скорости начала псевдоожжения; некоторые из них приведены в табл. 1. Для сравнительного анализа приведенных формул (1)–(6) все они были представлены в виде зависимости

$$Re_0 = f(\Lambda r),$$

где $Re_0 = w_0 d / \nu$ — число Рейнольдса для начала псевдоожжения;

$$\Lambda r = \frac{g d^3 (\gamma_1 - \gamma)}{\gamma^2} \quad \text{— число Архимеда;}$$

d и γ_1 — средний размер и плотность твердых частиц;

γ и ν — плотность и кинематическая вязкость оживающего агента;

g — ускорение силы тяжести.

При этом, в целях сопоставления, в формуле (4) значения порозности ε_0 и фактора формы частиц Φ_s соответственно приняли равными 0,4 и 1,0.

Таблица 1

Сводка формул для расчета Re_0

№ формулы	Автор; № литературного источника	Формула	Область применения
(1)	Бейлин [2]	$Re_0 = 0,046 Ar^{0,587}$	Ламинарное и турбулентное течения
(2)	Розловский [6]	$Re_0 = 0,111 Ar^{0,5}$	Ламинарное и турбулентное течения
(3)	Горошко, Розенбаум, Тодес [3]	$Re_0 = Ar (1400 - 5,22 \sqrt{Ar})$	Ламинарное и турбулентное течения
(4)	Аюлян, Касаткин [7]	$Re_0 = 0,009 Ar_0^2 / [\Phi_S(1 - \epsilon_0)]$	$Re_0 < 35$
(5)	Мухоменов, Трабер, Румянцева [4]	$Re_0 = 0,0031 Ar$	Ламинарное течение, $D = 45 \text{ м.м}$
(6)	Смирнов, Еркюва [8]	$Re_0 = 0,00054 Ar$	Ламинарное течение, $D = 23 \text{ м.м}$

На рис. 1 в логарифмических координатах представлены зависимости $Re_0 = f(Ar)$, построенные по формулам (1) - (6) для исследованного диапазона Ar .

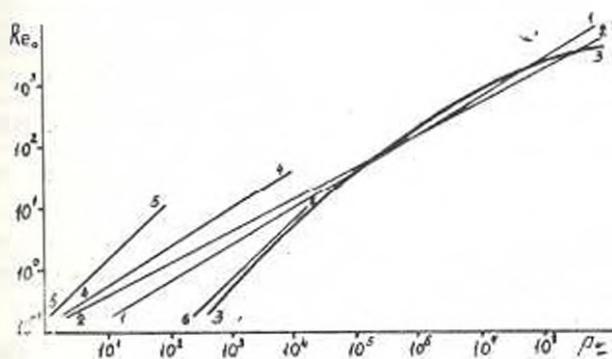


Рис. 1. Зависимости $Re_0 = f(Ar)$. (Цифры у кривых соответствуют нумерации формул в табл. 1)

Используемое в расчетах число Архимеда содержит кажущуюся плотность твердых частиц $\gamma_s = \gamma_{sk}$, отличающуюся от истинной плотности γ_{sk} , характеризующей свойства монолитного (сплошного) материала⁹. Кажущуюся плотность определяли, измеряя вес (массу) образца сухого (G_c) и увлажненного (G_n) пористого твердого материала, содержащего фиксированное количество жидкости ($G_k = G_n - G_c$) известной плотности γ_{sk} , по формуле:

⁹ Разумеется, для непористых материалов значения γ_k и γ_n совпадают.

$$\gamma_k = \frac{\bar{G}_b}{\bar{G}_c} \frac{\gamma_{ж}}{1 + \frac{\gamma_{ж}}{\gamma_{и}}} = \frac{\bar{G}_b}{\bar{G}_c} \frac{\gamma_{ж}}{\gamma_{и}} \quad (7)$$

Значения величин, входящих в (7), определяли следующим образом. Заранее увлажненный зернистый материал в количестве около десяти граммов слегка прокатывали по сухой бумаге с целью удаления пленки жидкости из поверхности частиц, после чего взвешивали на аналитических весах с точностью 0,001 г для определения \bar{G}_b . Взвешенные влажные частицы твердого материала высушивали в сушильном шкафу, где поддерживали температуру $\sim 200^\circ\text{C}$. После полного высушивания твердых частиц их снова взвешивали и фиксировали \bar{G}_c . Значения $\gamma_{и}$ и γ_k для исследованных твердых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2
Значения $\gamma_{и}$ и γ_k для различных зернистых материалов*

Зернистый материал	Плотности, кг/м ³		Метод определения; литературный источник; расчетная формула
	$\gamma_{и}$	γ_k	
Алюмосиликагель	2300	1270	[9], $\gamma_k = 1,91 \bar{G}_b/\bar{G}_c$
Корунд	3500	3500	Пикнометрический, (7)
Поташ (гранулированный)	2320	950	[5], (7)
Стекло	2600	2600	Пикнометрический, (7)
Перлит (сырой)	2200	1600	Пикнометрический, (7)
Шлак	2800	2800	Пикнометрический, (7)

Для экспериментального определения скорости начала псевдооживления зернистых материалов в широком диапазоне температур была собрана установка, общий вид которой изображен на рис. 2. Установка включает греющую камеру 1, аппарат псевдооживления б, магнетающий (22) и всасывающий (18) вентиляторы, систему вылеуливания 20; 21, трубопроводы и измерительные приборы.

Греющая камера 1, предназначенная для подогрева воздуха, содержит 12 карборундовых электронагревателей (силитов) 2, охватывающих трубопровод с воздухом и помещенных в пространство, выложенное огнеупорными кирпичами 3. Греющая камера (как и аппарат для псевдооживления) изолирована от окружающей среды асбестовой теплоизоляцией 4. В рабочей части греющей камеры расположен трубопровод 5, соединенный с аппаратом 6 муфтой 7. Распределительная решетка 8 представляет собой проволочную сетку из нержавеющей

* Для гранулированного поташа значение γ_k определено по формуле (7), исходя из максимально возможной влагосодержания данного материала.

стали, оказывающую достаточно большое гидравлическое сопротивление и обеспечивающую равномерное распределение потока обжигающего агента. Для наблюдения за ходом процесса на боковой поверхности колонны предусмотрены два окна из кварцевого стекла.

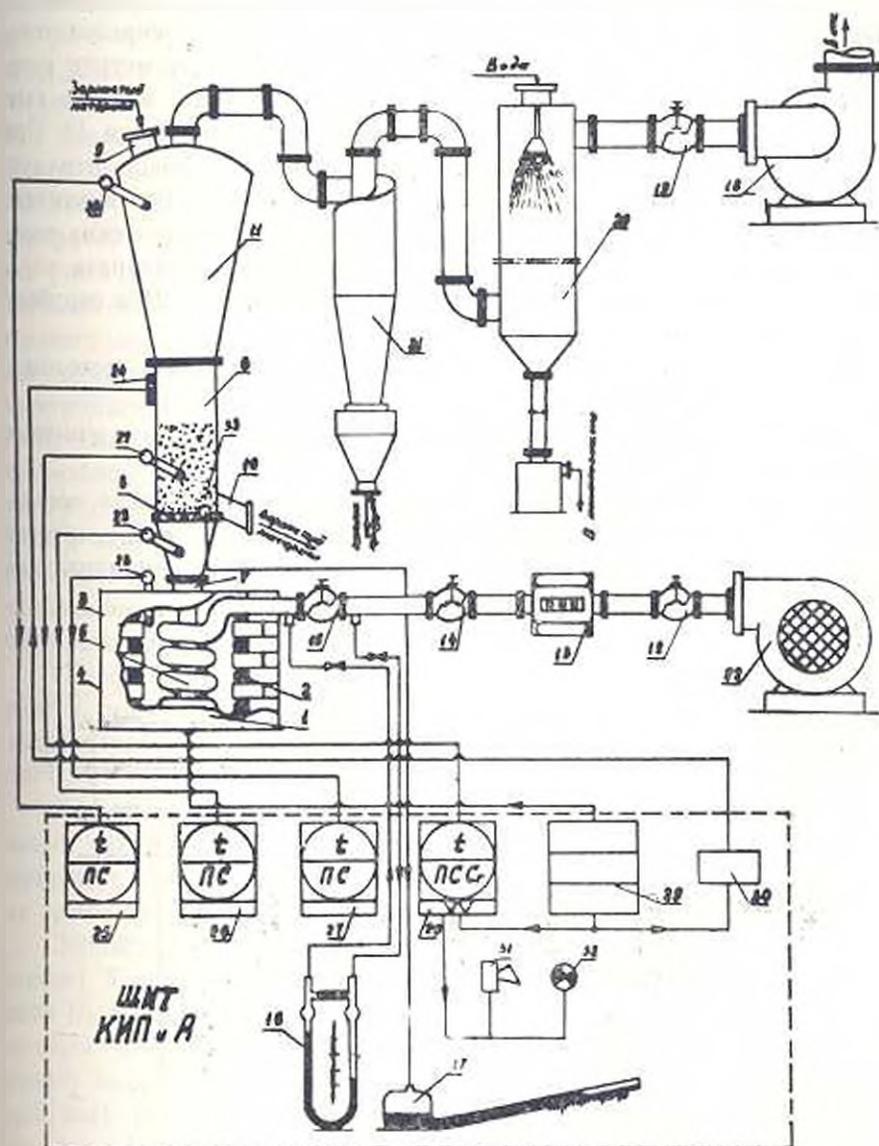


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема экспериментальной установки.

14, 19—венгили; 23—термопары; 24—дополнительный электрообогрев слоя; 29—регуляторы напряжения однофазные РНУ-40; 30—лабораторный интотрансформатор; 31—тудок; 32—лампа.

Зернистый материал загружается в аппарат через загрузочный штуцер 9, выпускается через штуцер 10. Для обеспечения полной выт-

ружки материала наклонный шпатель 10 расположен непосредственно над распределительной решеткой 8. Во избежание уноса зернистого материала при больших скоростях воздуха, верхняя часть аппарата 6 выполнена в форме диффузора 11.

Свежий воздух, нагнетаемый вентилятором высокого давления 28, подавали в аппарат кипящего слоя 6 через эжектор 5 и распределительную решетку 8. На трубопроводе подачи воздуха предусмотрен регулирующий вентиль 12. При достаточно больших расходах воздуха (выше $4 \text{ м}^3/\text{час}$) измерение последнего производили счетчиком 13. При расходах меньше $4 \text{ м}^3/\text{час}$ измерение производили специально отградуированным реометром 16, закрывая при этом вентиль 15. В зависимости от целей эксперимента, свойств материала и ряда технологических параметров, отходящие газы при необходимости удаляли из аппарата кипящего слоя отсасывающим вентилятором 18 через шклон 21 и скруббер 20, орошаемый водой.

Перепад давления воздуха в слое измеряли прямым методом с помощью микроманометра 17.

Измерение и контроль температуры слоя осуществляли с помощью термопар градуировки ХК и ХА.

Для проведения опытов при повышенных температурах в псевдооживленном слое (100; 200; 300; 400 и 500°C) была предусмотрена система регулирования и контроля температуры слоя, принципиальная схема которой показана на рис. 3.

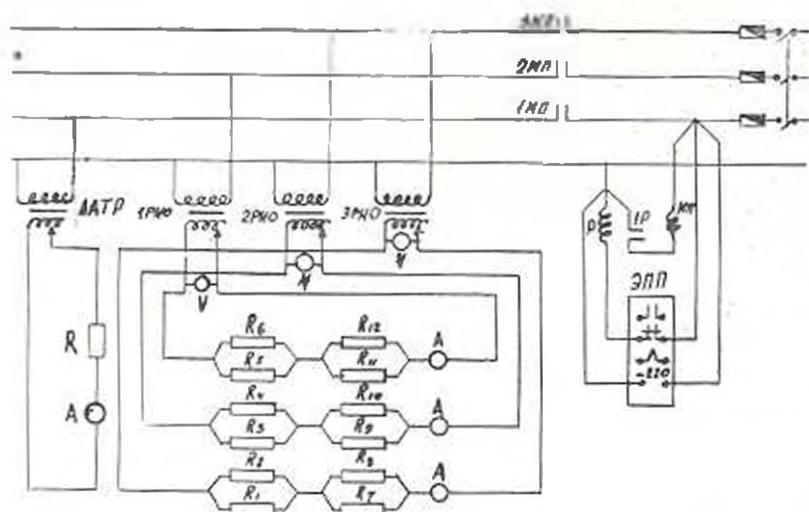


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема измерения и контроля температуры псевдооживленного слоя твердых частиц.

R —сопротивление дополнительного электрообогрева слоя, $R_1 \div R_{12}$ —карбюрндовые (силит) электронагреватели.

Ток и напряжение нагревателей (как карборундовых, так и дополнительного обогрева слоя) рассчитаны с учетом электротепловых характеристик применяемых элементов и технологических потребностей. Если температура слоя достигает заданного нижнего уровня (последний устанавливается с помощью подвижной стрелки потенциометра ЭПП), то при включении переключателя *И* включается электронный потенциометр ЭПИ и замыкает цепь обмотки электромагнитного реле *Р* через механический нормально-замкнутый контакт *1 ЭПП*. При этом срабатывает нормально-замкнутый контакт *1Р* и замыкается цепь обмотки электромагнитного пускателя *МII*, срабатывают нормально-разомкнутые контакты *1МII*, *2МII*, *3МII* и получают питание первичные обмотки однофазных регуляторов напряжений и автотрансформатора. Вследствие этого электронизмерительные приборы показывают номинальные значения тока и напряжений нагревателей. При достижении заданного верхнего значения температуры слоя размыкаются контакт *1 ЭПП*, цепь обмотки реле *Р*, нормально-разомкнутый контакт *1Р*, цепь обмотки электромагнитного пускателя *МII* и, следовательно, контакты *1МII*, *2МII*, *3МII* электромагнитного пускателя *МII*. Одновременно снимается напряжение с первичных обмоток регуляторов и автотрансформатора; электронизмерительные приборы при этом показывают нулевые значения тока и напряжений (соответственно отключенному состоянию электроустановки). Как только температура слоя понижается на 15—20 С, снова замыкается контакт *1 ЭПП*, и цикл повторяется в описанной выше последовательности.

Скорость начала псевдооживления определяли для зернистых материалов, приведенных в табл. 2. Ожижающим агентом служил воздух, температуру которого в ходе опыта варьировали в пределах 20—500°С.

Для экспериментального определения скорости начала псевдооживления какой-либо из использованных узких фракций зернистых материалов (т. е. монодисперсного слоя) при заданных температурах воздуха опыты проводили в следующем порядке.

Зернистый материал загружали в колонну (аппарат псевдооживления) *б* через штуцер и визуально измеряли высоту неподвижного слоя *H₀* с помощью специального измерителя, установленного по образующей цилиндрического аппарата. Затем постепенно увеличивали подачу воздуха от нулевого расхода до максимально возможного (прямой ход), регистрируя показания приборов (газового счетчика *13* или реометра *16*, термометров *25 : 28*, а также амперметров и вольтметров) при различных расходах. Далее опыт продолжали при понижении расхода воздуха до нуля (обратный ход), также снимая показания приборов.

Опыт проводили вначале при комнатной, а затем — при повышенных температурах, после чего материал выгружали из аппарата.

В ходе экспериментов определяли:

γ_0 — порозность неподвижного слоя при заранее найденной кажущейся плотности, γ_s — по объему засылки $V_0 = H_0 F_a$, где F_a — площадь полного поперечного сечения аппарата (диаметр аппарата $D_a = 105$ мм);

w — скорость воздуха в расчете на полное сечение аппарата — по показаниям счетчика (реометра);

ΔP — перепад давления воздуха в слое — по показаниям микроманометра.

Скорости воздуха w определяли по формуле (при постоянном давлении воздуха)

$$w = \frac{QT_{c1}}{3600 F_s T_1} \quad (8)$$

где Q — показание газового счетчика, $л^3/час$; T_{c1} и T_1 — абсолютные температуры воздушного потока и псевдоожигенном слое и измерительном устройстве (счетчике, реометре), соответственно. При измерении расхода воздуха реометром пользовались заранее построенными градуировочными графиками.

По сопряженным значениям w и ΔP построены кривые псевдоожигения $\Delta P = f(w)$; абсциссу точки пересечения линий постоянного перепада давления в псевдоожигенном слое и сопротивления неподвижного слоя (по кривой прямого хода) трактуем как опытное значение скорости начала псевдоожигения w_0 .

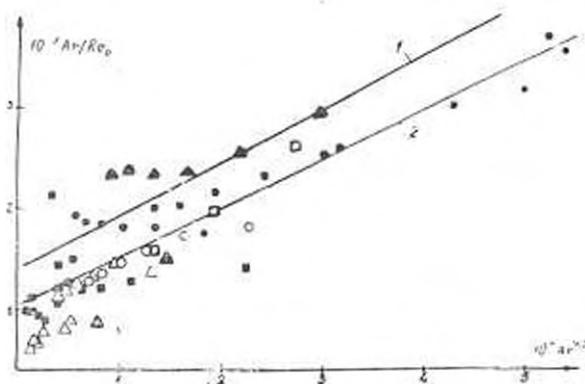


Рис. 4. Зависимости $Ar/Re_0 = f(Ar^{0.5})$:

1 — расчетная; 2 — опытная.

● — алюмосиликагель; Δ — корунд;

□ — поташ (гранулированный); ○ — стекло;

▲ — перлит (сырой); — шлак.

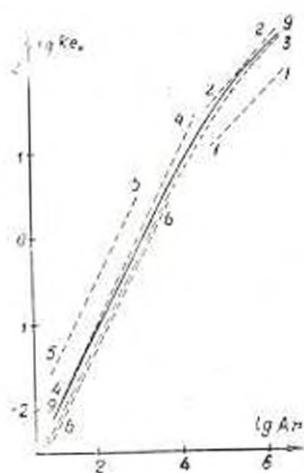


Рис. 5. Зависимости $Re_0 = f(Ar)$ в исследованном диапазоне числа Ar . (Цифры у кривых соответствуют нумерации формул в табл. I и в тексте).

На рис. 4 в координатах $(Ar/Re_0) - Ar^{0.5}$ сопоставлены экспериментально полученные значения ω_0 с рассчитанными по формуле (3) (кривая 1). Там же приведена корреляция (кривая 2), наилучшим образом соответствующая нашим экспериментальным данным и полученная в результате аппроксимации последних в манере, принятой авторами формулы (3). С уточненными численными коэффициентами предлагаемая корреляция для исследованных зернистых материалов имеет вид:

$$Re_0 = \frac{Ar}{1040 + 4.86 \sqrt{Ar}} \quad (9)$$

Опытные значения скорости начала псевдооживления ω_0 и расчетные, найденные по формулам (1) - (6), в виде зависимостей $Re_0 = f(Ar)$ в логарифмических координатах представлены на рис. 5.

Выводы

1. Исследование показало, что формулы, предназначенные для определения Re_0 в области ламинарного течения, заведомо непригодны для расчета начала псевдооживления исследуемых зернистых материалов, переходящих в псевдооживленное состояние, как правило, при переходном или турбулентном режимах движения оживляющего агента. Как и следовало ожидать, наибольшее расхождение (зачастую на несколько порядков) наблюдается в случае наиболее крупных фракций.

2. Наилучшие результаты дает универсальная формула (3), охватывающая различные гидродинамические режимы движения. Формулы (1) и (2) обнаруживают неплохое соответствие с экспериментом в более узких диапазонах свойств твердых частиц и температур процесса. Дело, видимо, в том, что по своей структуре эти две формулы не могут охватывать различные гидродинамические режимы, хотя авторы формул и рекомендуют их для расчетов в области ламинарного и турбулентного течений. Действительно, формула (2), судя по степени Ar , должна неплохо соответствовать турбулентному режиму, возможно несколько охватывая и переходный режим из-за относительно высокого значения множителя Ar ; формула (1), вероятно, должна давать неплохие результаты в области, примыкающей с обеих сторон к границе между переходным и турбулентным режимами. Таким образом, для ориентировочных расчетов ω_0 мы рекомендуем формулу (3), охватывающую различные гидродинамические режимы движения оживляющего агента.

3. Выведена корреляционная формула (9) для определения скорости начала псевдооживления ω_0 исследованных зернистых материалов в широком диапазоне изменения температуры процесса (20 - 500°C) и размеров частиц.

Ֆ. Ա. ԳԱՎԹՅԱՆ, Վ. Հ. ԱՅՆՇՏՅԱՆ, Ռ. Վ. ԿՐԿՐՈՐՅԱՆ, Մ. Գ. ՀԱՄԱՐՅԱՆ:

ՈՐՈՇ ԱՐԳՅՈՒՆԱՐԵՐԱԿԱՆ ՀԱՏԻԿԱՎՈՐ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՊԱՆՎԳՈՇԵՂՈՒԿԱՅԻՄԱՆ ԿՐԻՏԻԿԱԿԱՆ ԱՐԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ ԻՐԱԿԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողափափում արված է իրական պայմաններում արդյունաբերական հատիկավոր նյութերի պսևդոհեղուկացման կրիտիկական արագությունը փորձարարական եղանակով որոշելու մեթոդիկա: Ենթադրված է մշակված փորձարարական կայանքի տեխնոլոգիական սխեման և պինդ մասնիկների շերտի պսևդոհեղուկացման ջերմաստիճանի կարգավորման ու ստուգման համակարգի սխեման:

Բերված են փորձարարական եղանակով որոշ արդյունաբերական հատիկավոր նյութերի (այլումաթիլիկազել, կորունդ, պոտաշ, ապակի, պեոլիտ, խարամ) պսևդոհեղուկացման կրիտիկական արագության որոշման արդյունքները, որոնք համադրված են հաշվարկային արժեքների հետ՝ հաշված տարբեր հեղինակների կողմից առաջարկված բանաձևերով: Համադրումը ցույց է տվել, որ ամենալավ զուգամիասությունն է տալիս (3) ունիվերսալ բանաձևը, որն ընդգրկում է հեղուկացնող աղենաի շարժման տարբեր հիդրոդինամիկական սեփմաները:

Հետազոտվող նյութերի պսևդոհեղուկացման կրիտիկական արագության որոշման համար ստացված է (9) կոոլյացիոն բանաձևը, որն ընդգրկում է պրոցեսի ջերմաստիճանի և նյութի մասնիկների մեծության փոփոխության լայն դիապազոն՝ $t = 20 - 500^\circ \text{C}$, $d = 0,63 - 2,5$ մմ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ромашков П. Г., Раишкөвская Н. В. Сушка во вращающемся состоянии. Изд. «Химия», Л., 1968.
2. Бейлин М. И. «Химическая технология топлив и масел», № 1, 19, 1961.
3. Горюхи В. Д., Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. «Шестия вулов. Нефть и газ», № 1, 125, 1958.
4. Михленов И. П., Трибер Л. Г., Румянцев Е. С. «Химическая промышленность», № 8, 457, 1955.
5. Позин М. Е. «Технология минеральных солей» Изд. «Химия», М., 1970.
6. Розловский А. А. «Цветная металлургия», № 2, 37, 1962.
7. Аюпян Л. А., Кагаткян А. Г. «Химическая промышленность», № 2, 94, 1955.
8. Смирнов А. А. Труды Куйбышевского индустриального института, т. VIII, 1959.
9. Справочник химика, т. 5. Изд. «Химия», М.—Л., 1968.