

Аспирант Е.С. Нечаева

(Кемер. технол. инс-т пищ. пром.) кафедра машины и аппараты пищевых производств

Роторный распылительный пылеуловитель

Приведены результаты исследований гидравлических сопротивлений, брызгоуноса и эффективности пылеулавливания в роторном распылительном пылеуловителе. Исследовано влияние частоты вращения распылителя, приведенной скорости газа и диаметра распыливающих отверстий на гидравлические сопротивления, величину брызгоуноса и эффективности пылеулавливания в аппарате диаметром 0,25 м. В качестве модельной жидкости использована вода. Представлены результаты математической обработки.

Results of researches of hydraulic resistance, ablation of splashes and efficiency of dedusting in the rotor spray dust collector are given. Influence of frequency of rotation of the spray, the specified speed of gas and diameter of spattering holes on hydraulic resistance, size ablation of splashes and efficiency of a dedusting the device by diameter 0,25 m is investigated. As model liquid water is used. Results of mathematical processing are presented.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, брызгоунос, эффективность пылеулавливания скорость газа и жидкости, роторный распылительный пылеуловитель, диаметр распыливающих отверстий.

Очистка промышленных газов от пыли пищевых продуктов является актуальной проблемой в ряде отраслей пищевой промышленности и перерабатывающих отраслях АПК [1-5]. Например [1-2], потери сухого молока в сушильных установках типа ВРА-4, RS-1000, предусмотренные техническим паспортом, составляют 4 % от производительности сушилки, но могут достигать и значительно больших величин. Кроме экологической и санитарно-гигиенической эта проблема имеет существенную экономическую значимость – теряются десятки тонн готового продукта, что отражается на рентабельности и размерах прибыли предприятий.

Выбор конструкции пылеуловителя осуществляется с учетом технико-экономических характеристик, физико-химических свойств улавливаемых пылей и их дисперсного состава. В [1-2] отмечается, что более половины массы пыли, образующейся при производстве крахмала, сухого молока, кристаллической глюкозы и др. составляют частицы размером менее 10 мкм. Такие частицы неудовлетворительно улавливаются циклонами [4], которые используют на первой ступени очистки газов, поэтому на второй применяют рукавные фильтры и мокрые пылеуловители.

Рукавные фильтры обеспечивают степень улавливания частиц размером менее 1 мкм не менее 99 % [4]. Однако имеют высокое гидравлическое сопротивление и недостаточную эксплуатационную надежность (вследствие порывов фильтровальной ткани). Кроме

этого осаждаемые на фильтровальной ткани частицы пыли пищевых продуктов подвергаются более длительному термическому воздействию со стороны сушильных газов, что приводит к перегреванию термолабильных составляющих частиц пыли. Вышесказанное ограничивает применение рукавных фильтров на второй ступени очистки сушильных газов.

Мокрый способ пылеочистки рассмотрен в ряде работ, например [1-6] и др. Он имеет свои достоинства и недостатки. Анализ технико-экономических показателей мокрых пылеуловителей позволяет сделать следующие выводы [1-6, 8].

Роторные аппараты с внутренней циркуляцией рабочей жидкости обеспечивают степень очистки газов от частиц пыли размером 1-5 мкм на 95-99 % при незначительных удельных энергозатратах и невысокой плотности орошения.

Наличие ротора несколько снижает эксплуатационную надежность по сравнению, например, с полыми скрубберами, которыми оснащены установки Я9 – ОМП – 1, однако затраты на эксплуатацию и ремонт, обеспечивающие их надежную работу, не выше, чем на очистку и эксплуатацию форсунок в полом скруббере [5].

Как отмечается в [5] оснащение систем очистки газов от пыли пищевых продуктов аппаратами «мокрой» пылеочистки роторного типа с внутренней циркуляцией и самоорошением позволит снизить потери продукта без существенного роста его себестоимости.

Основным направлением в совершенствовании аппаратов мокрой пылеочистки следует считать снижение энергозатрат на их работу при повышении фракционной эффективности.

Нами были исследованы основные рабочие характеристики роторного распылительно-пылеуловителя (РРП) с внутренней циркуляцией и самоорошением рабочей жидкостью [7]. Исследованы эффективность пылеочистки, брызгоунос и гидравлическое сопротивление.

В качестве основных модельных пылей использованы пыли: сухого молока, лактозы, сахара. В целях экономии дорогостоящих пылевидных продуктов на первом этапе использовали угольную пыль марки К – коксующийся, взятую с угольного предприятия ОАО ЦОФ «Березовская» г. Березовский, Кемеровская область. Исходные пыли измельчались на вибрационной мельнице МВ-60 с рабочими органами в виде стержней. После каждого прохода измеряли размер частиц на цифровом микро-

скопе марки Levenhuk D870T, снабженном программным обеспечением для определения площади поверхности частицы.

Гранулометрический состав полученных пылей представлен в таблице 1. Концентрация пылей задавалась, исходя из требований норм ПДК для каждого продукта, и соответствовала 2,5-10 мг/м³. Использовали дробно - факторный эксперимент, а при работе на угольной пыли реализована методика полно-факторного эксперимента, чтобы более полно установить влияние всех комбинаций факторов планирования на процесс пылеулавливания. Для получения пылей использовался: сахар-песок (ГОСТ 21-94), лактоза (IST 173057512-17.2006 стандарт предприятия Литвы), сухое молоко («Молоко цельное сухое, ГОСТ 449 5-87 Технические условия»), которое было привезено с ООО «ЛУАНКОС и К», г. Куйбышев Новосибирская обл. Продукт был непосредственно снят с рукавного фильтра.

Т а б л и ц а 1

Дисперсный состав пылей

Вид пыли	Содержание частиц пыли (в % от их общего количества)							Медианный размер частиц, d_{50} , мкм
	<1 мкм	2 мкм	3 мкм	4 мкм	5 мкм	6 мкм	7 мкм	
угольная	65	13	14	3,5	2	~1	~1,5	1,4
сахарная	70	15	11	3	1	-	-	1,9
лактоза	96,3	3,5	0,2	-	-	-	-	1,3
Сухое молоко	81	7	6	2,7	2	1	1,3	1,9

Методика пылеулавливания принята согласно [4], а именно: пылезаборная трубка, изготовленная по рекомендациям Гинцветмета, соединена с пылесадительным циклоном, установленным в специальном трубопроводе, через который с помощью воздуходувки воздух откачивался из воздуховода со скоростью $U_{ан} = 1-4$ м/с. В пылесадительном циклоне установлен аналитический аэрозольный фильтр АФА ВП 20-1, каждый из которых подсушивался в эксикаторе в течение суток перед и после эксперимента. Фильтр взвешивался до и после запыления на аналитических весах марки ВЛР – 200 класс точности 2. Каждое измерение повторяли по три раза.

При исследовании брызгоуноса был использован сепарационный метод определения количества унесённой жидкости, то есть с помощью выносного инерционного сепаратора. Этот метод достаточно прост и надёжен и широко применяется в экспериментальных исследованиях и на производстве.

Методика измерения гидравлического сопротивления РРП состояла в измерении разности статического давления на входе и выходе. Статическое давление измерялось через дренажные отверстия в стенках газоходов с помощью микроманометра типа ММН-240.

Эксперименты проводились при варьировании параметров в следующих пределах: диаметр диспергирующих отверстий $d_0 = 1,4-2,5$ мм с одинаковым окружным ($t_{окр}$) и осевым ($t_{ос}$) шагом $t_{ос} = t_{окр} = 2,5d_0$, отверстия расположены в 6 рядов в шахматном порядке; скорость газа в аппарате $U_{ан} = 1-4$ м/с; частота вращения распылителя задавалась из условий его устойчивой работы и была равна $n = 800-1000$ об/мин, что обеспечивало скорость истечения жидкости в пределах $U_{ж} = 3,14-4$ м/с. Эксперименты выполнены на системе воздуховода при температуре 18 ± 2 °С.

При исследовании пылеочистки было установлено, что во всем диапазоне варьирования параметров на всех модельных пылях эффективность составляла не менее 99 %.

Обработка опытных данных позволила полу-

$$\eta = 98,91 + 0,14d_0 + 0,37U_{жс} + 0,059C_n + 0,27U_{Г} - 0,098d_0U_{жс} + 0,008d_0C_n - 0,04d_0U_{Г} - 0,02U_{жс}C_n - 0,0965U_{жс}U_{Г} - 0,007C_nU_{Г};$$

чить уравнение для расчета эффективности: $R^2 = 0,94$ (1)

где R^2 - коэффициент корреляции.

Физико-химические характеристики рабочей жидкости (таблица 2) (плотность, $\rho_{ж}$, кг/м³; вязкость, $\mu_{ж} \cdot 10^3$, Па*с; поверхностное натяжение жидкость, $\sigma_{ж} \cdot 10^3$, Н/м) замерены при работе РПП и составили:

Т а б л и ц а 2

Физико-химические свойства рабочей жидкости

Вид пыли	$\rho_{ж}$	$\mu_{ж} \cdot 10^3$	$\sigma_{ж} \cdot 10^3$
	кг/м ³	Па*с	Н/м
Уголь	1008	1,34	68,53
Сухое молоко	886	57,1	44,75
Лактоза	887	50,4	40,61
Сахар	1039	16,2	28,1

Результаты исследования брызгоуноса представлены на графиках (рисунки 1-2).

Обобщенная формула для расчета брызгоуноса в исследованном диапазоне изменений параметров имеет вид:

$$e = 0,2451 \cdot 10^{-6} \cdot d_0^{2,07} \cdot U_{жс}^{1,60} \cdot U_{Г}^{0,24};$$

$$R^2 = 0,942124, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

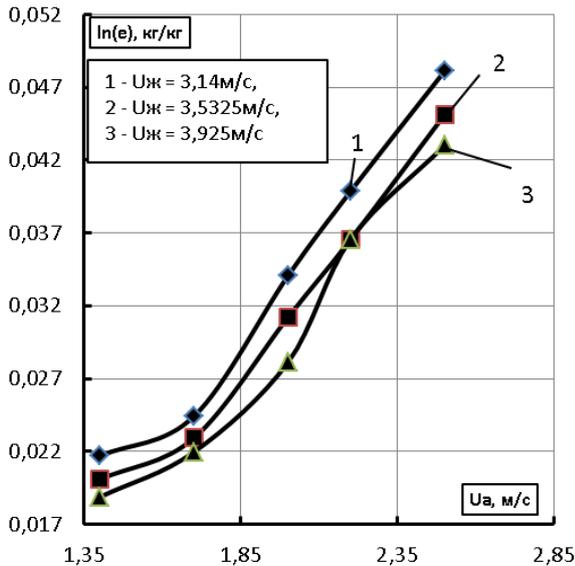


Рисунок 1 - Зависимость брызгоуноса от скорости газа в аппарате при $d_0 = 2,0$ мм.

Из графиков, представленных на рисунках 1 и 2, можно сделать вывод, что с увеличением частоты вращения ротора, то есть увеличением скорости капель факела распыленной жидкости, ударное взаимодействие этих капель с пленкой жидкости на пристенном каплеотбойнике происходит более интенсивно и количество мелкодисперсных капель, полученных при этом взаимодействии, увеличивается. Эти капли больше подвержены брызгоуносу. Увеличение скорости газовой фазы в аппарате увеличивает брызгоунос. Как следует из (2), d_0 оказывает наибольшее влияние на брызгоунос, что связано с увеличением производительности распылителя.

Во всем исследованном диапазоне относительный брызгоунос (кг жидкости на 1 кг газа) не превышает 0,05, что допустимо [6].

Полученные экспериментальные данные обрабатывались в программе Microsoft Office Excel 2007. Из данных, представленных на рисунке 3, следует, что вращающийся распылитель в неорошаемом (сухом) аппарате создает определенное гидравлическое сопротивление проходу воздуха. Причем с увеличением частоты вращения сопротивление снижается. Данное явление можно объяснить вентиляционным эффектом, создаваемым вращающимся распылителем и крыльчаткой. При скорости воздуха в РПП 3,5 м/с потери напора возрастают на 10-15 % за счет вращения распылителя с частотой $n = 900-1000$ об/мин.

В целом гидравлическое сопротивление неорошаемого РПП при $n = 900$ и 1000 об/мин остается невысоким.

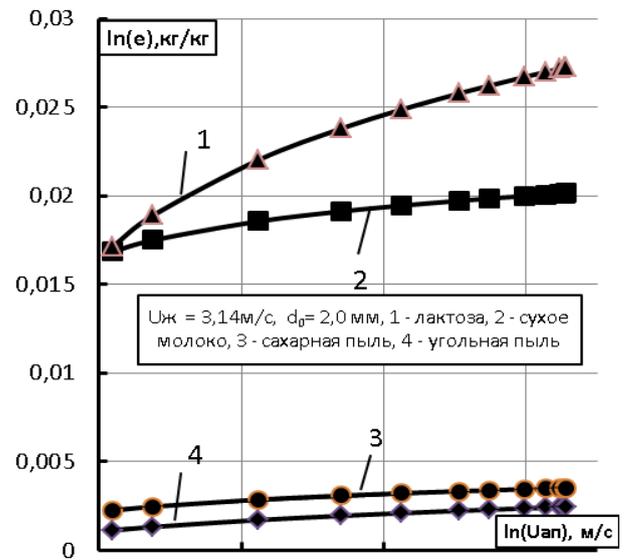


Рисунок 2 - Зависимость брызгоуноса от скорости газа в аппарате.

Сопоставляя данные на рисунках 3 и 4, можно сделать выводы, что ΔP_{ϕ} в РРП достаточно велико и в несколько раз превышает $\Delta P_{\text{сух}}$. Как следует из данных на рисунке 4, с увеличением частоты вращения распылителя ΔP_0 несколько снижается. На наш взгляд, это можно объяснить вентиляционным эффектом, создаваемым вращающимся распылителем и факелом жидкости.

Математическая обработка данных, представленных на рисунке 3, позволила получить уравнение.

$$\Delta P_{op} = 486,5537 + 103,2143 \cdot U_{an} - 31,8471 U_{жс} + 0 \cdot d_0, \text{ Па}$$

$$R^2 = 0,9995. \quad (3)$$

где R^2 – коэффициент корреляции.

Из анализа уравнения (3) следует, что влиянием d_0 на ΔP_{op} можно пренебречь. Учитывая, что $\Delta P_{\text{сух}} \ll \Delta P_{op}$, уравнение (3) можно рекомендовать для расчетной практики.

Как показывают данные на рисунке 4, в диапазоне $U_{an} = 1,0 \dots 4,0$ м/с гидравлическое сопротивление исследуемого РРП меняется в пределах 460-790 Па.

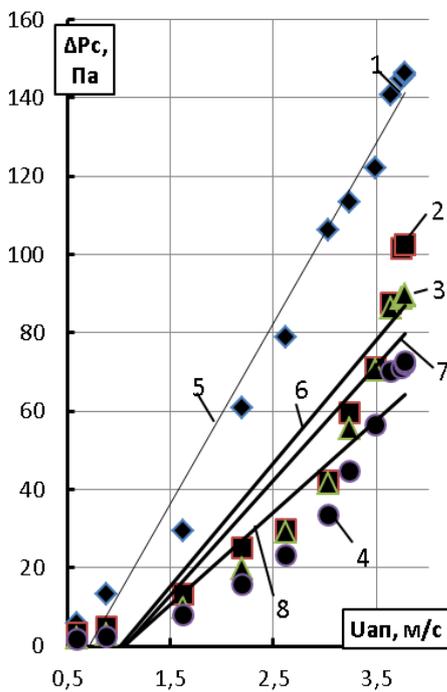


Рисунок 3 - Зависимость гидравлического сопротивления сухого аппарата от скорости газа
 Экспериментальные данные: 1 - $n = 800$ об/мин, 2 $n = 900$ об/мин, 3 $n = 1000$ об/мин; 4 $n = 0$ об/мин.
 Результат математической обработки:
 5 $U_{жс} = 3,14$ м/с; 6 - $U_{жс} = 3,5325$ м/с; 7 - $U_{жс} = 3,925$ м/с; 8 - $n = 0$ об/мин.

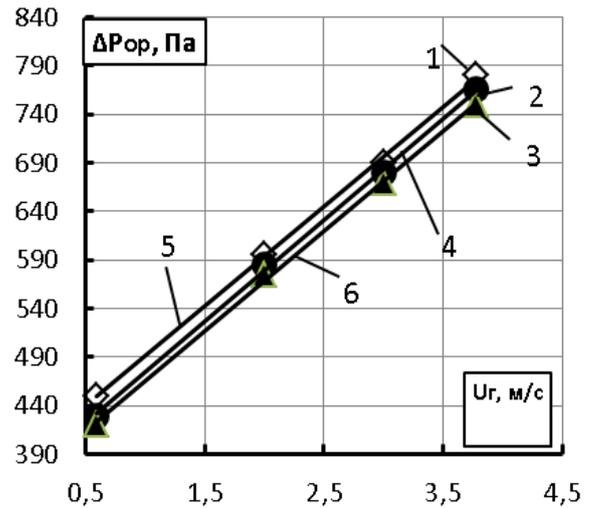


Рисунок 4 - Зависимость гидравлического сопротивления орошаемого аппарата от скорости воздуха ($d_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м)

Экспериментальные данные: 1 $n = 1000$ об/мин, 2 $n = 900$ об/мин, 3 $n = 800$ об/мин. Результат математической обработки: 4 - $U_{жс} = 3,925$ м/с; 5 - $U_{жс} = 3,5325$ м/с; 6 $U_{жс} = 3,14$ м/с.

В работе [3] приведены технико-экономические характеристики мокрых пылеуловителей различных конструкций. Наиболее близким по конструктивному решению является роторный распылительный газопромыватель (РРГ), который имеет лучшие характеристики. Сопротивление РРГ в диапазоне скоростей газа $U_{an} = 1,5 \dots 3,1$ м/с составляет $\Delta P_{op} = 150 \dots 730$ Па. РРП при $U_{an} = 2,5 \dots 3,8$ м/с имеет практически одинаковое с РРГ ΔP_{op} .

Сумма расходов на работу аппарата складывается из затрат на электроэнергию, на работу системы «мокрой» очистки, стоимости орошающей жидкости, затрат на амортизацию, текущий ремонт и из затрат на утилизацию шлама. При многократном использовании орошающей жидкости весомые затраты приходятся на энергозатраты при работе пылеуловителя.

Расчет удельных энергозатрат $K_{yд}$ (МДж/1000 м³ газа) на работу аппарата «мокрой» пылеочистки определяется по формуле:

$$K_{yд} = P_A + P_{жс} \cdot \frac{v_{жс}}{M_{г}} + \frac{N_M}{v_{г}}, \quad (4)$$

где P_A – гидравлическое сопротивление аппарата (Па); $P_{жс}$ – давление распыливаемой жидкости (Па); $\frac{v_{жс}}{v_{г}}$ – объемный расход соответственно жидкости и газа (м³/с); N_M - мощность

вращающегося механизма, расходуемая на контактирование газа с жидкостью (W_T); M_G – масса газа (кг).

Поэтому внедрение на пищевые предприятия аппарата «мокрой» пылеочистки роторного типа позволит снизить потери готовой продукции без роста её себестоимости.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что основным направлением в совершен-

ствовании аппаратов «мокрой» очистки следует считать снижение энергозатрат на их работу при повышении фракционной эффективности.

В таблице 3 представлена сравнительная характеристика аппаратов «мокрого» способа очистки, которые используются в пищевой промышленности [1-5], данные по РРП получены автором.

Т а б л и ц а 3

Аппараты мокрого типа очистки

Показатель	Тип аппарата									
	СДК	СИОТ	ЦВП	Вентури	ГДП-М	ГРБ	Я9-ОМП-1	РРГ	РРГ-1	РРП
Диаметр, м	1,2-2,4	1,3-5,4	0,3-1,0	0,15-1,9	1,0-1,5	0,6-1,5	~2,5	0,25-1,6	0,25-1,6	0,25-1,6
Скорость газа, м/с	4-7,5	14-20	4,5-7,1	50	10-12	1-4	1,4	1,5-3,1	1,95-3,25	1,0 - 4
Плотность орошения, $m^3/(m^2 \cdot \text{ч})$	25-35	0,06-17,2	0,6-20	0,7-111	0,02-4,8	(0,6-6) $\cdot 10^{-3}$	0,94-1,04	(0,4-120) $\cdot 10^{-5}$	(0,4-1) $\cdot 10^{-5}$	(0,04 - 0,5) $\cdot 10^{-3}$
Гидравлическое сопротивление, кПА	1,2-3,5	1,1-2,0	0,36-0,9	2,3	1,8	0,55-0,8	0,62-0,74	0,15-0,7	0,08-0,6	0,46-0,79
Эффективность очистки, %	96-99,6	99,9	90-95	99	99	98-99	95-96	99,9	99,9	99,9
Диаметр улавливаемых частиц, мкм	2	5	5-10	1,0	5	7-8	нет данных	1,4	1,2	1,3-1,9
Удельные энергозатраты, МДж/1000 m^3 газа	7,2	1,5-24	0,6-6,3	2,8-69,8	1,2-8,8	0,8-2,3	0,64-0,81	0,34-1,26	0,16-0,8	0,55-0,8

ЛИТЕРАТУРА

1 Варваров, В.В. Очистка теплоносителя при сушке пищевых продуктов [Текст] / В.В. Варваров, Г.Б. Дворецкий, К.К. Полянский. – Воронеж: Издательство ВГУ, 1987. – 192 с.

2 Варваров, В.В. Проблема улавливания пылевидных фракций сыпучих пищевых продуктов [Текст] / В.В. Варваров // Известия вузов. Пищевая технология. - 1988. - № 4 - С. 27-35.

3 Сорокопуд, А.Ф. Совершенствование мокрого пылеулавливания в технологии сыпучих пищевых продуктов [Текст] / А.Ф. Сорокопуд, М.И. Даниленко // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. - 1997. - №4. – С. 3.

4 Штокман, Е.А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности [Текст] / Е.А. Штокман. - М.: Агропромиздат, 1987. – 107 с.

5 Сорокопуд, А.Ф. Технико-экономические предпосылки выбора рационального пылеуловителя [Текст] / А.Ф. Сорокопуд, М.И. Даниленко, С.А. Максимов // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. - 2002. - № 10. – С. 62-64.

6 Сугак, Е.В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами [Текст] / Е.В. Сугак. – Казань: РИЦ «Школа», 1999. – 224 с.

7 Пат. 229610 Российская Федерация, МПК В 01 D 47/16 Роторный пылеотделитель [Текст] / А.Ф. Сорокопуд. - Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности». – № 95109057/25; заявл. 02.06.1995; опубл. 27.04.1998.

8 Ужов, В.Н. Очистка газов мокрыми фильтрами [Текст] / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1972. – 278 с.

REFERENCES

1 Varvarov, V.V. Coolant treatment for drying foodstuffs [Text] / V.V. Varvarov, G.B. Dvoretzky, K.K. Polyansky. - Voronezh: VSU Publisher, 1987. - 192 p.

2 Varvarov, V.V. The problem of dust collecting fractions of bulk foods [Text] / V.V. Varvarov // Proceedings of the universities. Food technology. - 1988. - № 4 - P. 27-35.

3 Sorokopud, A.F. Improving wet dedusting technology bulk foods [Text] / A.F. Sorokopud, M.I. Danilenko // Storage and processing of agricultural raw materials. - 1997. - № 4. - P. 3.

4 Shtockman, E.A. Dust extraction in the food industry [Text] / E.A. Shtockman. - M. Agropromizdat, 1987. - 107 p.

5 Sorokopud, A.F./ Techno-economic background of choosing the rational scrubber [Text] / A.F. Sorokopud, M.I. Danilenko, S.A. Maksimov // Storage and processing of agricultural raw materials. - 2002. - № 10. - P. 62-64.

6 Sugak, E.V. Purification of gas emission in devices with intense hydrodynamic cal regimes [Text] / E.V. Sugak. - Kazan: RIP "Shkola", 1999. - 224 p.

7 Pat. 229610 Russian Federation, IPC 01 D 47/16 Rotary dust separator [Text] / A.F. Sorokopud. - The applicant and patentee HPE «Kemerovo Technological Institute of Food Industry". - № 95109057/25; appl. 02.06.1995, publ. 27.04.1998.

8 Uzhov, V.N. Wet gas cleaning filters [Text] / V.N. Uzhov. - M.: Khimiya, 1972. - 278 p.