

ТРАНСПОРТ

УДК 621.547

Чальцев М.Н., к.т.н., Бугаев Б.Е.

АДИ ГВУЗ «ДонНТУ», г. Горловка

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Приведен научно обоснованный метод расчета критического режима пневмотранспортирования. Результаты расчета проверены экспериментально на промышленном стенде. Сравнение результатов расчета и результатов опытов показывает их хорошее совпадение.

Введение

Транспортирование твердых дисперсных материалов по трубам при помощи потока сжатого воздуха широко используется в различных отраслях промышленности. Надежность и эффективность работы пневмотранспортных установок в первую очередь зависят от того, какие расчетные значения основных параметров пневмотранспортирования заложены в их проект.

Одним из основных параметров пневмотранспортирования сыпучих материалов является критическая скорость потока воздуха, которая характеризуется минимальными энергозатратами на транспортирование. В то же время при этом режиме происходит выпадение твердых частиц на нижнюю стенку горизонтальной трубы, т.е. начинается завал трубопровода. Ясно, что обеспечение надежности и экономичности работы пневмотранспортной установки на стадии проектирования требует наличия точной методики прогнозирования критического режима пневмотранспортирования.

Анализ последних исследований и публикаций

К настоящему времени известны расчетные зависимости, предназначенные для определения критической скорости пневмотранспортирования [1, 2]. Однако они носят эмпирический характер, и область их применения ограничена условиями эксперимента. Ограниченность, а в некоторых случаях и недопустимо низкая степень точности этих зависимостей не всегда удовлетворяют современным требованиям проектирования и создания промышленных пневмотранспортных систем. Поэтому в АДИ ГВУЗ «ДонНТУ» (г. Горловка) в результате выполненных исследований аэродисперсных потоков в приложении к проблемам пневмотранспорта были созданы научно обоснованные методы расчета. [3]. Создана также аналитическая модель аэродисперсного потока в коротких горизонтальных трубах [4], на базе которой разработаны научно обоснованные методы гидравлического расчета пневмотранспортных трубопроводов [5, 6], в том числе — расчета параметров потока в критическом режиме [7]. При этом были учтены также последние достижения решения аналогичных проблем в области гидротранспорта [8].

Целью работы является проверка точности расчетных параметров критических режимов пневмотранспортирования по их опытным данным при помощи разработанных методов гидравлического расчета пневмотранспортных трубопроводов.

Критический режим пневмотранспортирования

В зависимости от величины средней скорости потока воздуха возможны три характерных режима пневмотранспортирования сыпучих материалов в горизонтальных трубах: режим стабильного перемещения твердого материала без заилиenia нижней стенки трубы, режим нестабильного движения твердого материала при частичном или полном выпадении его в осадок и критический режим, разделяющий режимы стабильного и нестабильного пневмотранспортирования.

Стабильное перемещение твердого материала наблюдается при достаточно больших средних скоростях потока воздуха и характеризуется тем, что твердые частицы транспортируются во взвешенном состоянии и практически равномерно распределяются по поперечному сечению трубы. В данном случае процесс взвешивания твердых частиц, обусловленный вертикальными турбулентными пульсациями скоростей потока, преобладает над силой тяжести. При меньших скоростях в большей мере проявляется сила тяжести и поэтому наблюдается перераспределение твердого материала по сечению трубы: большая концентрация выявляется у нижней части сечения трубы, а меньшая — у верхней части этого сечения. При дальнейшем уменьшении скорости воздуха основная масса твердого материала скапливается у дна трубы и начинает нарушаться стабильность транспортирования. Наконец, при еще меньших скоростях образуется осадок на нижней стенке трубы. Скорость движения воздуха, соответствующая началу нарушения стабильности транспортирования твердого материала, т. е. началу заилиenia нижней стенки трубы, называется критической скоростью пневмотранспортирования. Следует отметить, что при критической скорости удельный перепад давления является наименьшим в сравнении с удельными перепадами давления при скоростях больших или меньших критической, поэтому критический режим пневмотранспортирования считается наиболее экономически выгодным.

Система алгебраических уравнений, описывающая критический режим пневмотранспортирования сыпучих материалов, имеет вид [7]:

$$\bar{\lambda} \left[1 + \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) \frac{\mu_v}{1 + \mu_v} \right] \lambda \frac{u_{kp}^2}{2gD} = \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) K, \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \left[1 - (1 - \varphi) \operatorname{th} \left(47,16 \sqrt{\mu_v} \right) \right], \quad (2)$$

$$\varphi = 0,127 + (1 + 1,016 \operatorname{Re}_T) 0,022 \operatorname{Re}_T, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\dot{m}_T}{\rho_T F u_{kp}}, \quad (4)$$

$$K = \begin{cases} \frac{\beta_1 \mu}{0,04 \beta_1 + (\mu_v - 0,04) \beta_2} & \text{при } \mu_v \leq 0,04; \\ \text{при } \mu_v > 0,04; \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{0,316}{(\operatorname{Re})^{0,25}}, \quad (6)$$

$$\operatorname{Re} = \frac{uD}{\nu}. \quad (7)$$

В (1) — (7) приняты следующие обозначения: ρ_T , ρ — плотность твердых частиц и воздуха; \dot{m}_T — массовый расход твердого материала; u_{kp} — критическая скорость потока воздуха; λ — коэффициент гидравлического сопротивления; Re — число Рейнольдса для

воздуха; g — ускорение свободного падения; D — внутренний диаметр трубы; Re_T — число Рейнольдса для твердых частиц:

$$Re_T = \frac{dw}{\nu}, \quad (8)$$

где d и w — диаметр и скорость взвешивания (гидравлическая крупность) твердых частиц;

ν — кинематическая вязкость воздуха.

Твердые частицы считаются мелкими, если $d < 100$ мкм и $Re_T < 5$.

Коэффициенты β_1 или β_2 в (5) зависят от соотношения диаметров $\frac{d}{D}$.

Удельный перепад давления для значений $u \geq u_{кр}$:

$$\frac{\Delta P_{TP}}{L} = \bar{\lambda} \rho \bar{\lambda} \frac{\rho u^2}{2D}, \quad (9)$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{кр} + 0,0082 \left(\frac{u}{u_{кр}} - 1 \right), \quad (10)$$

$$\bar{\rho} = 1 + \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) \frac{\mu_v}{1 + \mu_v}. \quad (11)$$

Уравнение (1) получено в предположении, что воздух — несжимаемая среда. Однако, если отношение перепада давлений на концах трубы Δp к давлению в начальном сечении трубы p_1 обычно не превышает 0,05, то в данном случае, согласно [9], сжимаемостью воздуха можно пренебречь. Если это отношение больше 0,05, то трассу условно разделяют на расчетные участки меньшей длины.

Практические расчеты критической скорости, выполненные в системе уравнений (1) — (11) для разных условий пневмотранспортирования, представлены в работах [5, 6, 7]. Сравнение результатов расчета с опытными данными, полученными в аналогичных условиях, дает их хорошую сходимость.

Созданное программное обеспечение предоставляет новые возможности аналитических исследований критических режимов, описанных приведенной здесь системой уравнений.

В базу данных расчетной программы может быть включено любое количество наименований сыпучих материалов, их плотность и средний диаметр частиц. В качестве исходных данных вводится расход материала и диаметр трубопровода. Результат расчета получаем в виде фазовой диаграммы в координатах

$$\frac{\Delta P_{TP}}{L} = f(u).$$

Критическая скорость транспортирования $u_{кр}$ указана на диаграмме отдельно. Типовой расчет критического режима пневмотранспортирования каменноугольной золы по трубопроводу диаметром 0,05 м представлен на рис. 1.

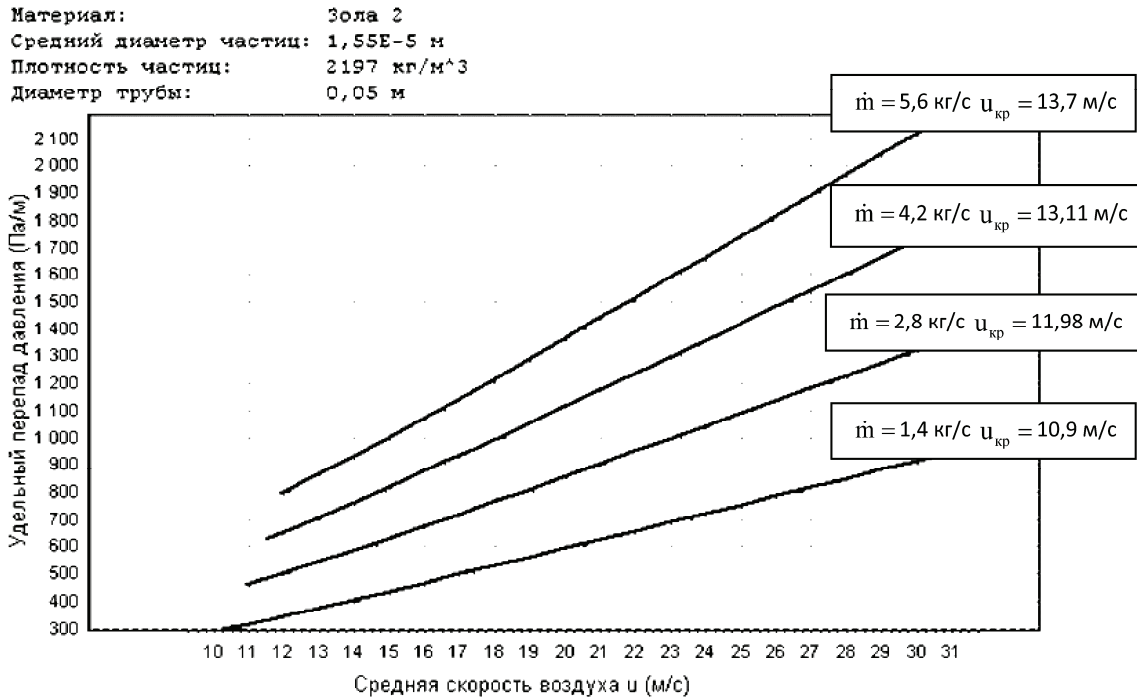


Рис. 1. Расчет критической скорости для каменноугольной золы в трубе Ду 0,05 м

Для установления степени достоверности уравнения (1) расчетные значения критической скорости $u_{кр}$, полученные из решения этого уравнения для заданных условий пневмотранспорта, сопоставлены с экспериментальными значениями. Для этого были выполнены экспериментальные измерения $u_{кр}$ при пневмотранспорте цемента, каменноугольной золы, угольной пыли, а также концентрата железной руды согласно [10].

Экспериментальный стенд и исследуемые материалы. Для проверки достоверности математической модели критического режима аэродисперсного потока в горизонтальной трубе проведены опыты на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 2.

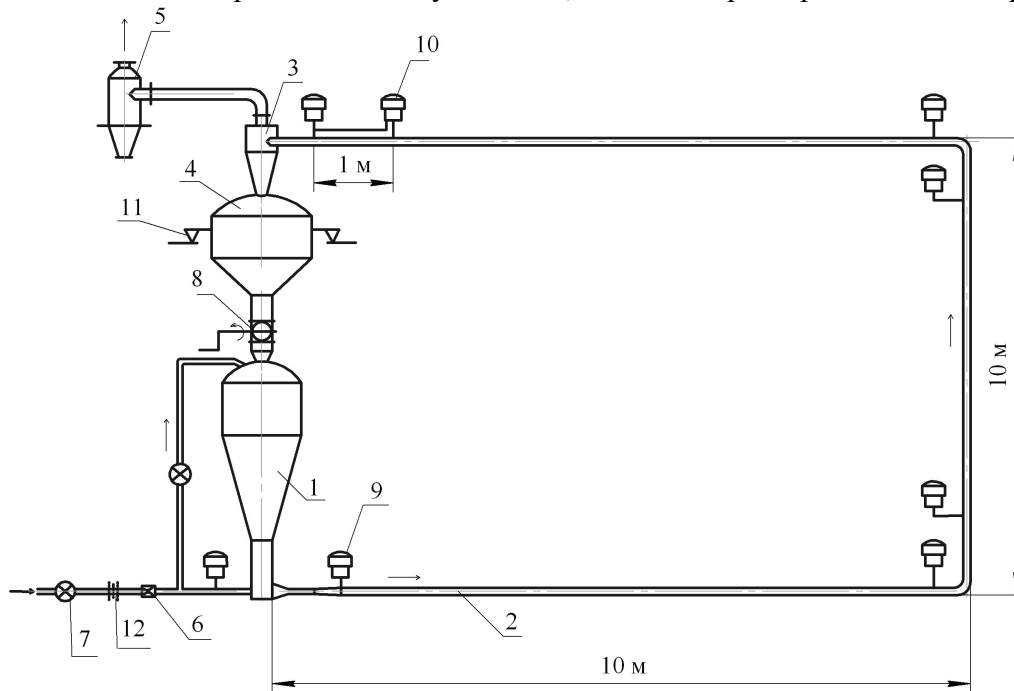


Рис. 2. Экспериментальная установка

В состав установки входят: камерный насос 1, трубопровод транспортный 2, циклон 3, весовой дозатор 4, тканевый фильтр 5.

В патрубке подачи сжатого воздуха в транспортный трубопровод установлено сопло Лавалья 6, которое стабилизирует расход сжатого воздуха, поступающего от компрессора через вентиль 7.

Загрузка камерного насоса из весового дозатора осуществляется самотеком через поворотный шибер 8.

Транспортный трубопровод с внутренним диаметром 50 мм состоит из трех прямолинейных участков. Из них два горизонтальных участка длиной по 10 м каждый и один вертикальный длиной 6 м. Отводы между ними имеют радиус изгиба 0,4 м.

Дозатор весовой 4 установлен на тензодатчиках 11, контролирующими массовый расход материала.

Расход воздуха в процессе транспортирования измеряется с помощью сужающего устройства 12. Проект сужающего устройства выполнен на основании РД 50-213-80 «Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами» в соответствии с ГОСТ 8.586.1-2005 «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств».

Для проведения исследований было изготовлено восемь сопел с калибрами, соответствующими расходу воздуха в 0,7; 1,18; 1,65; 2,12; 2,59; 3,06; 3,53 и 4,0 ($м^3/мин$).

В процессе исследований сопла последовательно переустанавливались от калибра к калибру, и на каждом сопле проводились эксперименты при измененных расходах материала в количестве 5, 10, 15 и (20 $т/час$).

Вдоль трассы трубопровода были установлены датчики давления 9 типа МТ-100, а на его конце — дифференциальный датчик давления 10 «Сапфир» московского ЗАО «Монометр».

В качестве транспортируемых материалов использовались цемент, каменноугольная зола и угольная пыль. Их характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики транспортируемых материалов

№ п/п	Твердый материал	d_T , мм	ρ_T , кг/м ³	W_T , см/с	Re_T	\dot{m}_T , кг/с	D , мм
1	Цемент	21	3060	4,08	0,057	1,4 – 5,6	50
2	Каменноугольная зола	23	2400	3,84	0,059	1,4 – 5,6	50
3	Угольная пыль	50	1600	12,1	0,40	1,4 – 5,6	50

Опыты по замеру удельных потерь давления при изменении расхода материала были выполнены для каждого из фиксированных значений расхода воздуха.

Полученные результаты и их сравнение. По результатам замеров получены опытные фазовые диаграммы для потоков цемента, каменноугольной золы и угольной пыли, представленные на рис. 3 а, б, и в, соответственно.

На рис. 3 г представлена фазовая диаграмма для концентрата железной руды, полученная в [11] в аналогичных условиях. На диаграммах значками ○, △, □ и × обозначены опытные точки, полученные в ходе замеров, а огибающие их сплошные линии — экспери-

ментальные кривые. Точки перегибов фазовых сплошных диаграмм характеризуют критический режим для различных значений расходов материалов. Соединяющие их линии — зависимости $u_{кр} = f\left(\frac{\Delta P_{кр}}{L}\right)$, полученные экспериментально.

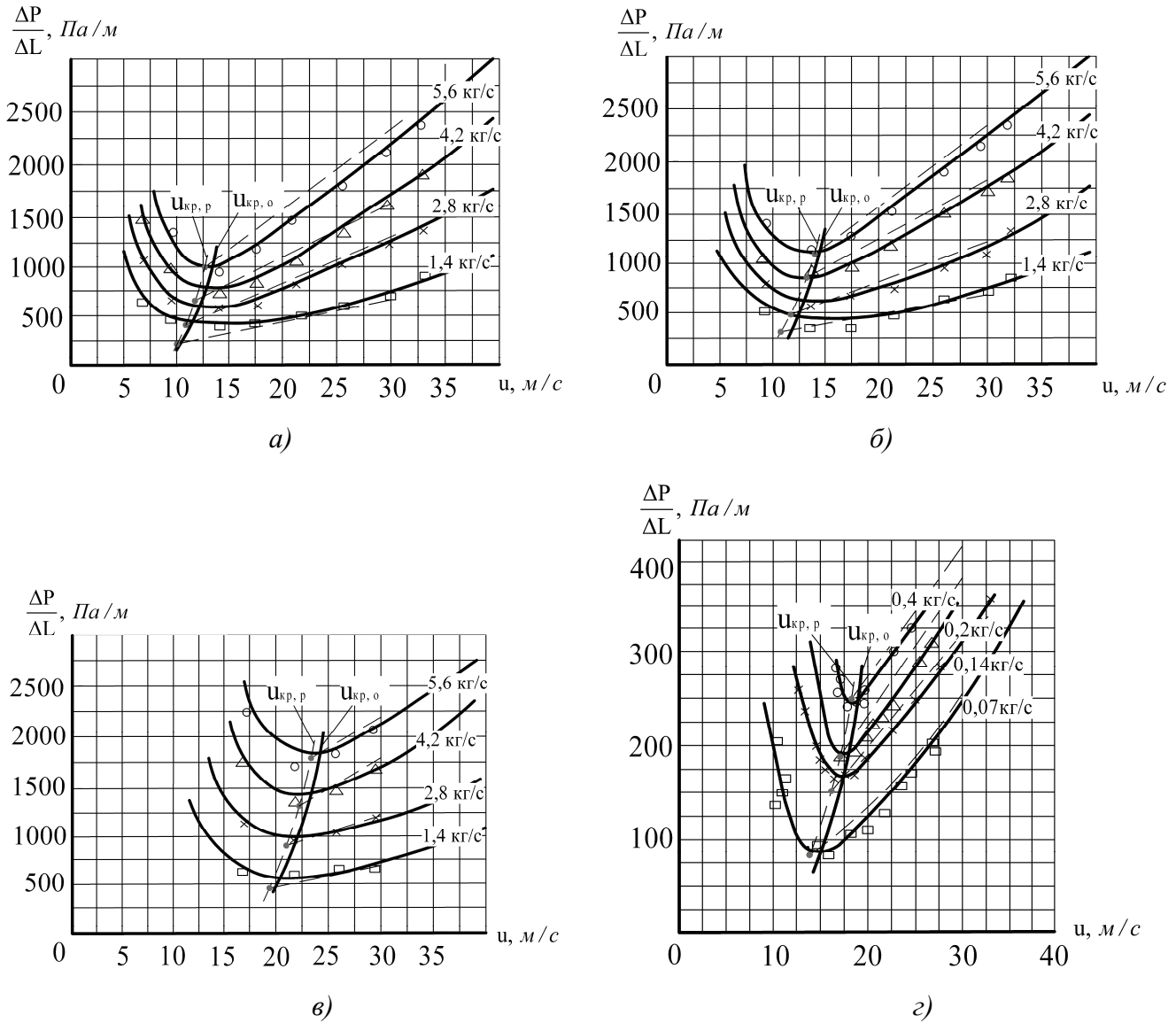


Рис. 3. Критические скорости транспортирования в горизонтальном трубопроводе Ду 50 мм:
 а) цемент б) зола в) угольная пыль г) концентрат железной руды
 $d_T=21$ мкм, $d_T=23$ мкм, $d_T=50$ мкм, $d_T=80$ мкм,
 $\rho_T=3060$ кг/м³; $\rho_T=2400$ кг/м³; $\rho_T=1600$ кг/м³; $\rho_T=1600$ кг/м³

Для сравнения на экспериментальные диаграммы нанесены пунктиром расчетные кривые и соответствующие им расчетные зависимости $u_{кр} = f\left(\frac{\Delta P_{кр}}{L}\right)$, которые располагаются достаточно близко от экспериментальных.

Также пунктиром соединены точки $u_{кр,р}$, полученные расчетным путем. Относительное отклонение расчетных экспериментальных значений критических скоростей находится в пределах 5 %.

Выводы

Результаты сопоставлений расчетных значений критической скорости пневмотранспортирования с их экспериментальными значениями свидетельствуют о достоверности разработанных методик расчета критических скоростей пневмотранспортирования дисперсных материалов по горизонтальным трубам.

Список литературы

1. Клячко Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, О.Х. Одельский, Б.М. Хрусталеv. — М.: Наука и техника, 1983. — 216 с.
2. Хрусталеv Б.М. Пневматический транспорт (теория, проектирование, реализация): дис. ... доктора технических наук / Б.М. Хрусталеv. — М., 1998. — 51 с.
3. Чальцев М.Н. Моделирование пневмотранспортного потока с учетом асимметрии поля скоростей несущей среды / М.Н. Чальцев // Современные научно-технические проблемы транспорта России: сборник материалов III Международной научно-технической конференции, 28-30 марта 2001 г. — Ульяновск: УВАУ ГА, 2002. — С. 137–140.
4. Криль С.И. Уравнение Бернулли для потока газозвеси / С.И. Криль, М.Н. Чальцев // Прикладна гідромеханіка / Національна академія наук України. Інститут гідромеханіки. — 2004. — Т. 6 (78). — №1. — С. 3–8.
5. Чальцев М.Н. Теоретические исследования потерь давления при пневмотранспорте по горизонтальным трубам / М.Н. Чальцев // Горная энергомеханика и автоматика. Т.2. — Донецк: ДонНТУ, 2003. — С. 204–210.
6. Чальцев М.Н. О гидравлическом расчете трубопроводов для пневмотранспортных систем / М.Н. Чальцев // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. — 2000. — Т.1, № 38. — С. 50–54.
7. Чальцев М.Н. К расчету критической скорости в системах пневматического трубопроводного транспорта / М.Н. Чальцев // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технологічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. — Кіровоград, 2000. — Вип. 7. — С. 125–129.
8. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки / С.И. Криль. — К.: Наукова думка, 1990. — 160 с.
9. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев.—М.: Стройиздат, 1975. — 327 с.
10. Кузнецов Ю.М. Теоретические основы, принципы конструирования и внедрение устройств для интенсификации процессов производства чугуна и стали путем вдувания в металл порошкообразных материалов: дис. ... доктора технических наук / Ю. М. Кузнецов. — Свердловск, 1987. — 321 с.

Стаття надійшла до редакції 16.02.10
© Чальцев М.М., Бугаєв Б.Є., 2010