

УДК 551.501 + 551.508

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ПЕСКА ВО ВРЕМЯ БУРЬ

Канд. физ.-мат. наук О.Е.Семенов

Описан прибор для улавливания частиц твердой фазы потока при песчаных бурях. Пескоуловитель может устанавливаться на метеорологических мачтах и удобен для проведения градиентных исследований. Случайные погрешности измерений прибора с вероятностью 0,95 меньше 20 %, с вероятностью 0,99 - менее 25 %. Систематические погрешности улавливаний для частиц в интервале 50-200 мкм не превышают 0,28-2,04 % в интервале скоростей потока 7,8-15,4 м/с.

Для ряда отраслей промышленности и транспорта, работающих в зоне распространения пыльных бурь, большое практическое значение имеет не только информация об общей массе песка, перемещаемой ветром в приземном слое атмосферы, но и более детальные сведения о ее вертикальном распределении, об изменении размеров частиц с высотой переноса. Количественная информация о переносе частиц твердой фазы в воздушном потоке может быть получена в виде двух физических величин - твердого расхода и массовой концентрации песка в воздухе. Термин массовая концентрация хорошо известен и широко используется в научной литературе. Терминология о расходе твердой фазы потока введена А.К.Дюниным сравнительно недавно [3]. Поэтому прежде чем рассматривать вопрос о точности измерений этого параметра остановимся на основных определениях и единицах измерений расхода песка.

Твердым расходом будем называть массу частиц твердой фазы (песок, соли, пыль), переносимую в единицу времени через единичную площадь сечения потока. Размерность твердого расхода $M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$

единица твердого расхода в СИ - $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Твердый расход связан с массовой концентрацией зависимостью

$$q_z = c_z \cdot u_p, \quad (1)$$

Здесь q_z - твердый расход песка на высоте z ; c_z - массовая концентрация на той же высоте; u_p - скорость частиц твердой фазы в воздушном потоке. Размерность массовой концентрации $\text{М} \cdot \text{Л}^{-3}$, единица в СИ - $\text{кг}/\text{м}^3$. Чаще для измерений массовой концентрации используют производные единицы - $\text{мг}/\text{м}^3$ или $\text{мкг}/\text{м}^3$. Более удобной величиной при определении масс песка или других аэрозолей, перемещаемых воздушными потоками, является твердый расход. По результатам измерений во время бурь пескоуловителями твердый расход рассчитывается по следующей формуле:

$$q_z = \frac{M_z}{F t}, \quad (2)$$

где M_z - масса песка, уловленного приборами на высоте z , кг ; F - площадь приемного отверстия прибора, м^2 ; t - время экспозиции прибора (время осреднения расхода), с .

Другой важной характеристикой ветропесчаного потока является общий расход Q_z , которым называется масса твердой фазы, переносимая в единицу времени через нормально ориентированную относительно потока поверхность, ограниченную полосой фронта переноса шириной 1 м и высотой z . Общий расход получается путем интегрирования профилей твердого расхода:

$$Q_z = \int_0^z q(z) \cdot dz, \quad (3)$$

Размерность общего расхода - $\text{М} \cdot \text{Л}^{-1} \cdot \text{Т}^{-1}$, единица в СИ - $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$. Величина Q_z называется

полным расходом двухфазного потока, если верхняя граница интегрирования в равенстве (3) равна максимальной высоте подъема частиц твердой фазы воздушным потоком.

Масса песка M (кг), перенесенного ветром за время пыльной бури через полосу фронта переноса шириной 1 м и высотой z может быть получена путем интегрирования по времени общего (или полного расхода)

$$M = \int_0^{\tau} Q_z(t) \cdot dt, \quad (4)$$

где $Q_z(t)$ — функция изменения общего (полного) расхода во времени; τ — продолжительность бури, с.

Общий уровень развития приборов для измерения перемещаемой потоком массы песка или пыли во время пыльных бурь и поземков можно оценить как низкий. Применяющиеся для этих целей пескоуловители как у нас в стране, так и за рубежом, представляют из себя лишь несколько модернизированные модели прибора, предложенного еще в 30-х годах Р.Багнольдом [7]. Обзор почти всех типов пескоуловителей сделан в работах А.П.Бочарова [2] и П.С.Захарова [4]. Наиболее совершенный из них состоит из флюгирующего корпуса, в который вставлена камера. Камера имеет узкую вертикальную щель, разделенную по высоте на несколько равных частей, т.е. в одном корпусе смонтировано фактически несколько пескоуловителей. Каждая часть — это прямоугольный канал с отражательными пластинами, изменяющими направление движения двухфазного потока. Вследствие этого поворота происходит выпадение частиц твердой фазы из потока. Они скатываются в приемные камеры, устанавливаемые в кассете, что позволяет ускорить и упростить смену наполненных приемных камер. Очищенный воздух выходит в полость корпуса, в верхней части которого имеются эжекционные отверстия для его отсоса из прибора [1]. Большим недостатком приборов такого типа является ограниченная возможность проведения измерений только лишь в самом нижнем слое атмосферы высотой до 1 м. Устанавливать их на метеоро-

логические мачты практически невозможно из-за их больших размеров и массы.

Не нашли применения при измерениях массовой концентрации песка во время песчаных бурь методы отбора на фильтры, широко используемые при исследованиях пыли. Крупные частицы песка плохо улавливаются фильтрами, отскакивая от их волокон.

В 70-х годах в КазНИГМИ был предложен принципиально новый прибор, который позволял проводить измерения на метеорологических мачтах [5]. Корпус этого пескоуловителя имел вытянутое вперед приемное сопло, заканчивающееся в отдельительной камере. В ней поток воздуха резко менял направление движения, вследствие чего частицы песка выпадали в приемную камеру. Последняя вставлялась в пазы днища корпуса. Прибор флюгировал за направлением ветра. Отличительной особенностью приемной камеры являлось то, что она была выполнена в виде плоско-параллельного электрического конденсатора. Это позволило осуществить дистанционный метод измерения массы улавливаемых частиц песка. К сожалению, дальше научно-исследовательской стадии дистанционный метод измерения не продвинулся, опытно-конструкторских работ и промышленного изготовления приборов налажено не было. В дальнейшем пескоуловитель КазНИГМИ был усовершенствован. Отделительная камера была выполнена в виде циклона с горизонтальной осью вращения воздушного потока. На рис.1 представлена схема этого пескоуловителя. Прибор состоит из вытянутого вперед сопла (1) с площадью приемного отверстия 50 см^2 , которое заканчивается в отдельительной камере (циклоне) (4). По обоим сторонам циклона имеются эжекционные отверстия, через которые очищенный от крупных аэрозолей воздух выбрасывается по выходным каналам (2) в поток. На выходных каналах крепятся два стабилизатора (3), с помощью которых приемное сопло прибора устанавливается навстречу потоку частиц песка и воздуха. Отделившиеся частицы собираются в приемной камере (5). Пескоуловитель устанавливается на консолях метеорологической мачты или поверхности песка на оси вращения (6).

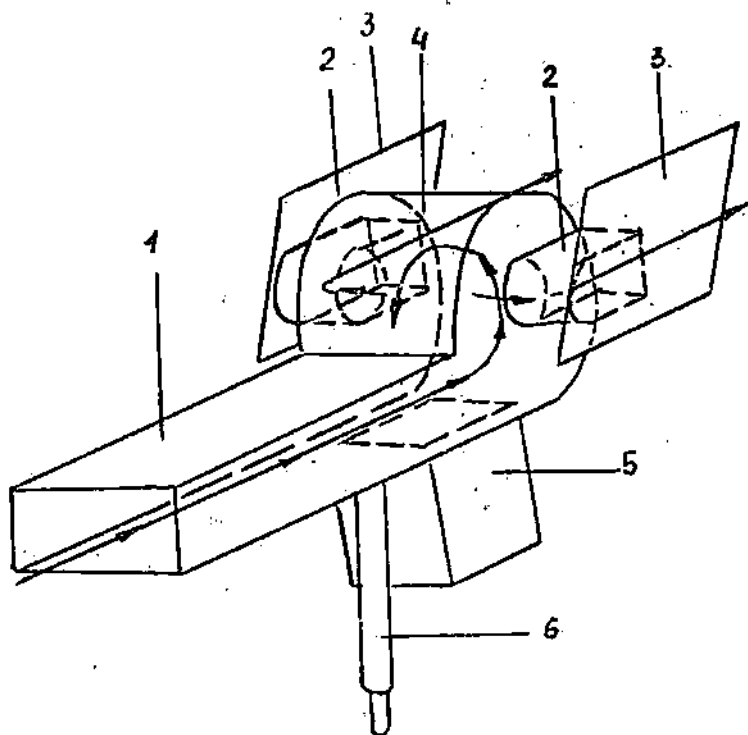


Рис. 1. Принципиальная схема пескоуловителя.

1- входное сопло, 2- выходные каналы,
 3- стабилизаторы, 4- отделительная камера
 циклон, 5- приемная камера, 6- ось вращения.

На рисунке стрелками показано направление движения двухфазного и очищенного воздушного потока. Пескоуловитель может использоваться в виде двух вариантов - дистанционного, если приемная камера (5) выполнена в виде электрического конденсатора и снабжена электронной схемой для передачи преобразованной в электрический сигнал информации о накопленной в приборе массе песка на расстояние, или обычного прибора со сменой приемной камеры через определенные интервалы времени. К настоящему времени с пескоуловителями КазНИГМИ выполнено уже достаточно большое количество измерений твердого и общего расхода песка в слоях различной высоты, которые позволяют оценить возможности их применения на практике. В работе [8] показано,

что причиной больших разбросов результатов измерений расхода является стохастичность процесса ветрового переноса твердой фазы. Статистический характер процесса объясняется турбулентной структурой воздушного потока, полидисперсностью частиц песка, многообразием других природных процессов, оказывающих влияние на неоднородность в пространстве интенсивности переноса твердой фазы. Существуют причины, связанные с несовершенством приборов, методик измерений и их анализа.

Случайные погрешности измерения приборов КазНИГМИ, вызванные этими факторами, выявлялись нами путем параллельного измерения переносимой массы песка двумя пескоуловителями, установленными на одной высоте, равной 25 см. Величины погрешностей измерений оценивались следующим образом. Как известно, средняя масса уловленного песка за j -ю бурю может быть рассчитана по формуле

$$\bar{m}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{ij}, \quad (5)$$

где m_{ij} - уловленная масса песка одним из пескоуловителей. Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_{ij} - \bar{m}_j)^2}, \quad (6)$$

ошибка среднего арифметического μ_j по формуле

$$\mu_j = \frac{\sigma_j}{n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{ij} - \bar{m}_j)^2}{n(n-1)}}. \quad (7)$$

Здесь i - порядковый номер пескоуловителя. При числе пескоуловителей $n = 2$ формула (7) принимает вид:

$$\mu_j = \frac{1}{2} \cdot (m_1 - m_2). \quad (8)$$

По формуле (8) рассчитывалась погрешность среднего арифметического каждого измерения и ее относительное значение

$$\varepsilon_j = \frac{\mu_j}{m_j} \cdot 100 \% \quad (9)$$

Результаты измерений и вычислений представлены в таблице 1, из которой следует, что случайные погрешности отдельных измерений пескоуловителей КазНИГМИ находятся в интервале от 0 до 21 %. Среднее значение погрешности среднего арифметического оказалось равным 9,3 %. Полученный ряд случайных погрешностей хорошо выравнивается на клетчатке вероятностей для нормального распределения, что позволило определить пределы изменчивости, за которые не выходят случайные погрешности - в 84 % случаев погрешность не превышает 15 % в 95 % случаев - меньше 20 % и 99 % - меньше 25 %.

Таблица 1
Случайные погрешности измерений массы переносимого песка при пыльных бурях

j	m_1 , г	m_2 , г	\bar{m}_j , г	μ_j , г	ε_j , %
1	0,70	0,80	0,75	0,05	6,7
2	0,50	0,50	0,50	0,00	0,0
3	4,83	4,63	4,73	0,10	2,1
4	1,40	1,60	1,50	0,10	6,7
5	9,42	12,93	11,18	1,76	14,9
6	1,78	2,40	2,09	0,31	14,8
7	0,42	0,64	0,53	0,11	20,8
8	1,68	1,40	1,54	0,14	9,1
9	1,74	1,99	1,86	0,12	6,5
10	4,98	6,14	5,56	0,58	10,4
11	2,72	3,32	3,02	0,30	9,9

Исследование систематических погрешностей пескоуловителя КазНИГМИ выполнялось в аэродинамической трубе. Для этого была создана установка, схема которой показана на рисунке 2.

В ней частицы песка из дозатора (4) поступали в трубу-смеситель (6), где они приобретали скорость потока воздуха. Выравнивание скоростей ветра в аэродинамической трубе и смесителе (6) осуществлялось путем изменения расхода воздуха от пылесоса, соединенного со смесителем.

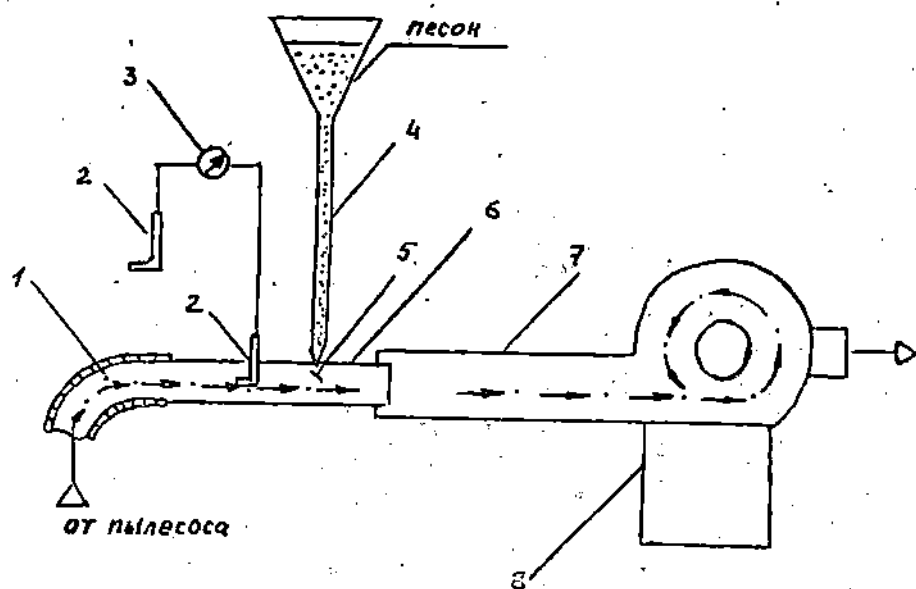


Рис. 2. Схема установки для определения систематических погрешностей пескоуловителей.

1- подводящая труба, 2- трубка Пито, 3- дифференциальный микроманометр, 4- дозатор, 5- турбулизатор, 6- смеситель, 7- пескоуловитель, 8- приемная камера.

Контроль за равенством скоростей проводился при помощи дифференциального микроманометра и двух трубок Пито, одна из которых размещалась внутри смесителя, вторая - в аэродинамической трубе. Из смесителя частицы песка попадали непосредственно в пескоуловитель.

редственно в входное сопло пескоуловителя. По разнице массы песка, выпущенной из дозатора (4) и уловленной в приемной камере (8), определялась эффективность улавливания прибором частиц различного размера. Измерения проводились в аэродинамической трубе при четырех - пяти значениях скоростей воздушного потока в диапазоне размеров частиц от 50 до 315 мкм. Результаты измерений и определения систематических погрешностей пескоуловителя представлены в таблице 2. Основные статистические величины этой таблицы рассчитаны по общепринятым формулам.

Таблица 2

Систематические погрешности измерений: средняя (δ), среднее квадратическое отклонение средней (σ), коэффициент вариации (C_v) и ошибка коэффициента вариации (ϵ) пескоуловителей до усовершенствования

U, м/с	δ , %	σ , %	C_v , %	ϵ , %
Размер частиц 50-70 мкм				
8,5	18,9	3,6	19,2	6,1
10,6	24,1	3,4	14,1	4,4
12,9	22,9	2,3	10,1	3,2
15,3	23,8	2,1	8,7	8,7
Размер частиц 70-100 мкм				
8,5	11,4	1,7	15,0	4,5
10,6	14,7	2,6	17,5	5,5
12,9	16,8	1,3	7,9	2,5
15,3	19,9	2,2	10,9	3,4
Размер частиц 100-140 мкм				
8,7	6,3	1,8	28,6	8,6
10,6	6,3	1,7	26,4	8,4
13,4	8,2	1,6	19,8	6,2
15,7	10,6	1,7	16,2	5,1
Размер частиц 140-200 мкм				
8,6	7,0	1,3	19,2	6,1
10,7	6,7	1,3	19,1	6,0
13,3	6,3	1,1	16,9	5,3
15,6	6,7	1,6	23,8	7,5

Продолжение табл. 2

U, м/с	δ , %	β , %	C_v , %	ϵ , %
Размер частиц 200-250 мкм				
8,6	6,5	1,1	17,5	5,6
10,6	6,8	1,3	19,5	5,2
13,3	5,9	0,9	14,8	4,7
15,4	6,4	1,1	17,2	5,4
Размер частиц 250-315 мкм				
8,5	6,9	1,1	16,4	5,2
10,6	5,8	1,2	19,8	6,0
13,3	5,2	0,5	10,3	3,2
15,3	6,0	0,8	13,4	4,2

Из данных таблицы 2 следует, что для мелких частиц песка (от 50 до 140 мкм) погрешность измерения возрастает с увеличением скорости ветра. Как и следовало ожидать, хуже улавливаются мелкие частицы размером 50-70 мкм. Их теряется до 19-24 %.

Частицы размером 70-100 мкм ловятся уже лучше - пескоуловитель недоучитывает их от 11 до 20 %. Песчинки крупнее 140 мкм практически улавливались прибором одинаково во всем исследованном интервале скоростей - лишь 5-7 % их пролетали через пескоуловитель.

Получив эти результаты мы незначительно модернизировали пескоуловитель, изменив конструкцию выходных каналов. В результате этих изменений фактически удалось избавиться от систематических погрешностей пескоуловителей КазНИГМИ - их величина сейчас не превышает 0,5-2 %. В таблице 3 представлены результаты определения систематических погрешностей недоучета массы песка усовершенствованных пескоуловителей.

К числу факторов, оказывающих влияние на величину погрешностей при определении массы уловленного приборами песка, следует отнести и изокINETИЧНОСТЬ отбора аэрозольных частиц из двухфазного потока, так как помещаемый в воздушно-песчаный поток пескоуловитель искажает линии тока воздуха.

Таблица 3

Систематические погрешности измерений:
 средняя (δ), среднее квадратическое отклонение
 средней (σ), коэффициент вариации (C_v)
 и ошибка коэффициента вариации (ϵ)
 модернизированных пескоуловителей

U, м/с	δ , %	σ , %	C_v , %	ϵ , %
Размер частиц 50-70 мкм				
7,8	1,60	0,12	7,90	2,5
10,1	2,04	0,54	26,00	8,4
11,5	1,30	0,10	7,50	2,4
13,2	1,50	0,48	31,00	10,0
15,1	1,30	0,38	28,40	9,0
Размер частиц 70-100 мкм				
8,5	0,67	5,15	22,60	7,2
9,8	0,63	0,14	22,70	7,2
11,3	0,65	0,15	24,00	7,6
13,2	0,72	0,37	50,50	16,0
15,4	0,80	0,30	37,00	12,0
Размер частиц 100-140 мкм				
8,7	0,53	0,07	14,00	4,0
10,1	0,64	0,20	31,00	10,0
11,5	0,69	0,27	40,00	12,0
13,2	0,62	0,35	58,00	12,0
15,4	0,41	0,16	39,60	12,5
Размер частиц 140-200 мкм				
8,5	0,28	0,09	31,10	9,8
10,1	0,32	0,11	34,40	10,9
11,1	0,33	0,07	22,40	7,1
13,2	0,30	0,09	29,20	9,2

Изучение обтекания прибора воздухом и забора им песчаных частиц из потока проводилось путем фотографирования их траекторий. Это позволило исследовать процесс улавливания песчаных частиц пескоуловителем при различных скоростях потока и размерах частиц. Частицы песка во время экспериментов вводились в поток с помощью дозатора, расположенного перед пескоуловителем на расстоянии в один метр. Значительный интерес при этом представлял случай обтекания и забора пескоуловителем

частиц мелкого песка. На полученных фотографиях не было заметно искажений в траекториях летящих частиц ни перед входным вытянутым вперед соплом пескоуловителя, ни вокруг него. Вместе с тем заметны резкие искажения траекторий частиц при их столкновении с корпусом пескоуловителя. Таким образом, фотосъемка летящих в потоке частиц песка указывает на изокINETичность отбора их пескоуловителем и отсутствие погрешностей, связанных с процессом попадания их в приемное сопло. Очевидно, это объясняется большой массой и временем релаксации таких крупных аэрозолей.

Выполненные исследования позволили оценить погрешности измерения пескоуловителей нашей конструкции, которые оказались сравнительно небольшими. Это позволяет с осторожным оптимизмом относиться и к имеющимся немногочисленным измерениям расхода песка различными типами уловителей других авторов, погрешности которых, к сожалению, не изучались. Результаты экспериментов позволяют также уточнить все ранее выполненные полевые градиентные измерения расхода песка во время бурь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. 229 024 СССР, кл. 421, 4/15 МПК G01n. Уловитель пыли вращающийся / А.П.Бочаров, Г.Ф.Данилина, А.А.Шульцэ.- Опубл. 1968, Бюл. N 32.
2. Бочаров А.П. Приборы и их применение в исследовании ветровой эрозии почв.- Алма-Ата: Кайнар.- 1972.- 96 с.
3. Дюнин А.К. Механика метелей.- Новосибирск: Изд-во СО АН СССР.- 1963.- 378 с.
4. Захаров П.С. Пыльные бури.- Л.: Гидрометеиздат.- 1965.- 164 с.
5. Семенов О.Е. О возможности применения емкостного датчика для дистанционного измерения расхода песка при пыльных бурях // Тр. КазНИГМИ.- 1972.- Вып. 49.- С. 37-41.
6. Семенов О.Е. Закономерности в вертикальной изменчивости переноса мелкого песка при пыльных

бурах // Тр. КазНИГМИ.- 1977.- Вып. 63.-
С. 3-17.

7. Bagnold R.A. Measurement of Sand Storms //
Proc. Roy. Soc., Ser. A.- 1938.- Vol. 167,
N 929.- P. 1127-1138.

Казахский научно-исследовательский институт
мониторинга окружающей среды и климата

ДАУЫЛ КЕЗДЕРІНДЕГІ ҚҰМ ШЫҒЫНЫН ДӘЛ ӨЛШЕУ ТУРАЛЫ

Физ.-мат. г. канд. О.Е. СЕМЕНОВ

Құм дауылы кезінде құмның қатты фазалық бөліктерін ұстауға арналған приборға түсініктеме берілген. Құм тұтқыш аспапты метеорологиялық мантыларға орнатуға болады және градиенттік зерттеулер жүргізуге ыңғайлы. Аспаптың шама көрсеткіші 0.95- азық өлшемі 20 % анықтық деңгейі 0.99 -аздық өлшемі 25 %. 7.8 -15.4 м/с дауыл екпіндігі аңғарымпаздық бейімділігі 0.28-2.04 %-тен артпайды. Аспаппен анықтау деңгейінің аз ауытқу мөлшері 0.95 ықтималдықта 20 %-тен, ал 0.99 ықтималдықта 25 %-тен төмен. Жел жылдамдығы 7.8 -15.4 м/с аралығында 50- 200 мкм бөлшектерді ұстаудың тұрақты ауытқуы 0.28-2.04 % - тен аспайды.