

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4 : 551.311.3

М. Е. БЕЛЬГИБАЕВ, О. Е. СЕМЕНОВ

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВЕТРОВОЙ РЯБИ
В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

В статье приводятся данные по условиям образования и существования эоловой ряби в аэродинамических трубах двух конструкций. Подтвержден полученный ранее Е. М. Минским вывод об ограниченном интервале скоростей ветра, при которых формируется и существует эоловая рябь. Полученные данные указывают, что в области существования эоловой ряби скорость перемещения ее гребней линейно зависит от скорости ветра и от величины расхода твердой фазы при увеличении длины рабочего участка аэродинамической трубы.

При движении двухфазного потока на границе двух разнородных сред нередко создается своеобразная волнистая поверхность рыхлого субстрата, называемая водной и ветровой песчаной рябью. Образование и динамика этой формы нанорельефа интересовали многих исследователей. Одним из первых среди них был Н. А. Соколов (1884), давший классификацию форм перемещения песка в приземном слое воздушного потока; он выделил три основных вида перемещения частиц: путем перекачивания и скольжения, скачкообразное и во взвешенном состоянии.

Большая сводка литературы по ряби приводится в работе Киндла и Бюхера (Kindl, Bücher, 1926), которые пытались установить различие между рябью, образованной ветром и водой, на основании отношения высоты песчаных волн к их длине. По данным этих авторов, это соотношение колеблется для ветровой ряби в пределах между 1 : 20 и 1 : 50, а для ряби, образованной водой, — между 1 : 4 и 1 : 10. Однако эти различия не всегда строго выдерживаются и порой трудно разграничить происхождение ряби только по указанному признаку.

В 1927 г. Б. П. Орловым и К. П. Боклевским впервые было произведено аэродинамическое моделирование дефляции песка (с образованием ряби) в лаборатории Ленинградского политехнического института (Щусев, 1928). Очень интересные данные по образованию ветровой ряби были получены Е. М. Минским (1935) в лаборатории ЦИС. Опыты производились в аэродинамической трубе шестиугольного сечения с замкнутой рабочей частью. Радиус трубы в рабочей части 29 см, длина 100 см. Была получена искусственная ветровая рябь и установлены некоторые особенности строения и перемещения песчаных волн в зависимости от скорости воздушного потока. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе с песком и супесью были проведены также Р. Вагнольдом (Wagnold, 1938). Наряду с экспериментальными работами большие исследования были проведены в натуре, главным образом в пустынной зоне (Петров, 1948; Знаменский, 1950; Добрин, 1959; Вейсов, 1968 и др.).

Песчаная рябь, образованная водными потоками, изучена гораздо лучше, и этому вопросу посвящено очень много работ (Белостоцкий,

1940; Лопатин, 1952; Маккавеев, Хмелева и др., 1961; Великанов, 1964; Михайлова, 1966 и др.). В монографии Н. А. Михайловой (1966) приводится подробный обзор литературы по вопросу переноса твердых частиц турбулентными потоками в связи с образованием песчаной ряби.

М. П. Петров (1950) определил процентное отношение частиц песка, перемещающихся различным образом в воздушном потоке: «Учитывая значение каждой формы движения песка в общем передвижении барханной цепи, можно сказать, что при средних скоростях ветра на высоте 0,2 м в форме ряби перемещается 15—20% песка, во взвешенном состоянии — до 35% и скачкообразно — до 50% общего количества песка». Известно, что наибольшей плотности ветропесчаный поток при дефляции почв достигает в приземном слое воздуха. А. И. Знаменский (1950) в понятие ветропесчаный поток включает «...не только движение песка над поверхностью, но и движение песка в форме ряби, представляющее собой волнообразное движение». При таком определении ветропесчаного потока процентный состав песка, участвующего в форме движения ряби и скачкообразном перемещении, возрастает до 70% от общего количества транспортируемого материала.

Основной причиной образования ветровой ряби некоторые исследователи считают возникновение вихрей (турбулентных потоков) в сфере взаимодействия двух потоков различной плотности (Петров, 1948; Федорович, 1948; Знаменский, 1950). Б. А. Федорович (1948) выделяет в воздушных потоках следующие вихревые движения: 1) с горизонтальной осью, перпендикулярной направлению потоков; 2) с горизонтальной осью, параллельной основному направлению потоков; 3) с вертикальной осью (смерчи). Движения первого рода формируют на дне потока рельеф, «поперечный» к его основному направлению. Формирование ветровой ряби также тесно связано с вихревыми потоками, образующимися первоначально за скоплениями крупного песка (рядками) на сравнительно ровной поверхности. После возникновения ветровой ряби и расчленения поверхности песка образуется устойчивая система вихрей с горизонтальной осью за валиками ряби (Знаменский, 1950).

Другой причиной образования ряби является, очевидно, воздействие пульсации скорости и давления потока на перемещение, эрозию и отложение твердых частиц (Лопатин, 1952; Великанов, 1964). Г. В. Лопатин (1952), изучавший изменение мутности воды реки Волги, приходит к такому выводу: «Рассмотрение материалов наблюдений «пульсации» взвешенных наносов создает представление об облакообразном характере движения взвешенных наносов. Взвешенные наносы движутся в естественных потоках в виде облаков («сгущений») различного размера, формы и концентрации; распределение этих облаков в потоке также неравномерно и изменчиво по времени...». Интересные данные по макропульсации концентрации частиц снега в воздушном потоке приведены в работе А. К. Дюнина (1963).

К указанным выше двум причинам можно добавить еще одну, связанную с неоднородной крупностью песков, подвергающихся дефляции или переносу в водных потоках. Некоторые исследователи предполагают, что при одинаковом размере всех частиц, слагающих тот или иной рыхлый субстрат, образования ряби под действием ветра и воды может не произойти. Однако в природе, очевидно, не существует такого рода «стандартных калиброванных» наносов, так как пески различного генезиса почти всегда содержат в том или ином количестве несколько фракций неодинаковых размеров. Известно, что в процессе формирования ветровой ряби принимают участие в основном частицы песка и гравия от 0,05 до 3 мм.

Наиболее подробно условия и механизм образования волн (ветровой ряби) на поверхности сыпучей среды описаны в монографии Б. А. Шуляка (1971).

Экспериментальные исследования по изучению ветровой ряби проводились авторами независимо на двух аэродинамических установках различной конструкции. Полевая аэродинамическая установка (ПАУ-2) конструкции А. П. Бочарова изготовлена на экспериментальном заводе КИМЭСХ (Алма-Ата) и представляет собой аэродинамическую трубу незамкнутого типа с закрытой рабочей частью (рис. 1). Рабочая часть установки представляет собой прямоугольную трубу с поперечным сечением $0,5 \times 1,0$ м, длиной 3 м; максимальная скорость воздушного потока на входе равна 17 м/сек. Пылеулавливающие трубки Альнера в блоке расположены на следующих высотах: 5; 12,5; 20; 30; 50 и 80 см. Методика работы и устройство ПАУ-2 описаны А. П. Бочаровым (1963).



Рис. 1. Полевая аэродинамическая установка (ПАУ-2). Фото М. Е. Бельгибаева

Исследования М. Е. Бельгибаева с применением ПАУ-2 проводились в 1965 г. на стационаре Института почвоведения АН КазССР в совхозе им. Белинского Кустанайской области. Описание почвенного покрова территории хозяйства и некоторые данные по результатам экспериментов уже опубликованы (Бельгибаев, Паракшина, 1970). Условия опыта в ПАУ-2 были таковы. На ровную плотную площадку под ПАУ-2 насыпали ветровой нанос мелкозема темно-каштановой супесчаной почвы слоем 4 см. Этот нанос содержал 11,9% среднего и крупного песка, 82,3% мелкого песка, 3,9% пылеватых частиц и 1,9% ила. Поверхность слоя тщательно выравнивалась перед каждым опытом. Каждый опыт с заданной скоростью воздушного потока в трубе продолжался в течение 5 мин в пятикратной повторности (Бочаров, 1963). Значения скоростей в трубе были от 3 до 10 м/сек, увеличиваясь от опыта к опыту на 1 м/сек (отклонение скорости воздушного потока от заданной величины по показаниям микроманометра составляло $\pm 0,2$ м/сек). После завершения очередного опыта определялось общее количество выдутого материала ($Q_{\text{ср}}$ по формуле А. П. Бочарова), не считая перемещенного волочением.

Основные условия, при которых формировалась ветровая рябь, и ее параметры приведены в табл. 1. Мощность ветропесчаного потока (H), указанная в данной таблице, определялась по наличию уловленного песка в различных пылесборниках. Перенос частиц в ПАУ-2 начинается при скорости воздушного потока 4 м/сек, измеренной на высоте 50 см от поверхности грунта. В отдельных вариантах опыта № 2 перенос мелкого песка путем перекачивания и сольтации отмечался при скорости воздушного потока 3,8 м/сек. По мере нарастания скорости воздушного потока возрастает и мощность ветропесчаного потока. При скорости 6 м/сек закладываются основы ряби; на ровной поверхности происходит сгуживание крупного песка в рядки, перпендикулярные направлению воздушного потока. При появлении неровностей на поверхности проду-

Таблица 1

Результаты опытов в ПАУ-2 при различных скоростях воздушного потока и длительности каждой продувки 5 мин

№ опыта	Скорость воздушного потока, м/сек	$Q_{ср}$, г	l , см	h , см	i	Мощность ветропесчаного потока (H), см	Расстояние от начала трубы до первой волны ряби, см	Характер движения частиц
1	3,0	—	—	—	—	—	—	Перемещения не наблюдается
2	4,0	—	—	—	—	5	—	Двигаются отдельные частицы менее 0,25 мм
3	5,0	—	—	—	—	20	—	Незначительный перенос тонких фракций кварцевого песка путем перекачивания и скачкообразно
4	6,0	3,18	—	—	—	30	—	Интенсивное перемещение песка путем перекачивания и сольтации. Закладываются основы ряби; происходит сгуживание крупного песка в рядки
5	7,0	8,85	6,0	0,2	30,0	50	140—160	Массовое перемещение песка всеми тремя видами. На 3-й мин возникает ветровая рябь
6	8,0	16,05	8,0	0,6	13,3	80	95—98	Массовое перемещение песка путем перекачивания, сольтации и во взвешенном состоянии. Возникает четко выраженная ветровая рябь
7	9,0	30,12	10,3	0,8	12,8	80	85—90	То же
8	10,0	59,47	10,5	0,86	12,2	80	80—85	Очень интенсивное движение ветропесчаного потока Рябь образуется на 2-й мин. К концу опыта местами (в средней зоне трубы) отмечается разрушение ряби с выдуванием песка и оголением площадки

Примечание. $Q_{ср}$ — вынос песка за 5 мин; l — длина волны ряби; h — высота волны ряби; $i = \frac{l}{h}$

ваемой площадки траектории скачущих (сольтирующих) песчинок собираются в пучки. Сольтирующие частицы при этом перемещаются не хаотично, «...процесс накопления и отрыва песчинок от поверхности... получает упорядоченность. В результате возникает ряд форм, повторяющих первичную неровность и расположенных друг от друга на равных расстояниях, зависящих от средней длины прыжка песчинок» (Арманд, 1971).

Ясно выраженная ветровая рябь возникает при скоростях воздушного потока от 7 до 9 м/сек. По мере нарастания скорости воздушного потока увеличиваются длина и высота волн ряби. Значение индекса ряби (отношение длины к высоте), по И. Белостоцкому (1940), уменьшается по мере нарастания скорости воздушного потока. При скорости воздушного потока свыше 10 м/сек ветровая рябь разрушается.

При скорости 7 м/сек и выше в рабочей части ПАУ-2 можно выделить три микрзоны: зона ветровой тени (нейтральная), зона выдувания и транзита, зона аккумуляции (рис. 2). Как видно из данных табл. 1, при увеличении скорости воздушного потока происходит уменьшение длины первой микрзоны — ветровой тени. Наиболее резкое сокращение этой зоны наблюдается при увеличении скорости воздушного потока от 7 до 8 м/сек. Далее происходит постепенное сокращение зоны ветровой тени (нейтральной) до 80—85 см от начала трубы при скорости 10 м/сек. С уменьшением длины первой микрзоны (нейтральной) соответственно увеличивается зона выдувания и транзита.

Ветровая рябь образуется во второй и третьей микрizonaх — зоне выдувания и аккумуляции. Образование последней зоны (аккумуляции), очевидно, связано с некоторым влиянием блока трубок Альнера на структуру и переходом ветропесчаного потока в вертикальное направление, что приводит к отклонению влекомого наноса. Количество переносимой почвы в трубе оказалось пропорционально величине $(u - u_k)$ в третьей степени

$$Q = 0,053 (u - u_k)^3 + 0,054 \quad (1)$$

где Q — расход твердого материала, $г/мин$;

u — скорость воздушного потока, $м/сек$; u_k — критическая скорость воздушного потока, при которой начинается перенос частиц ($4 м/сек$).

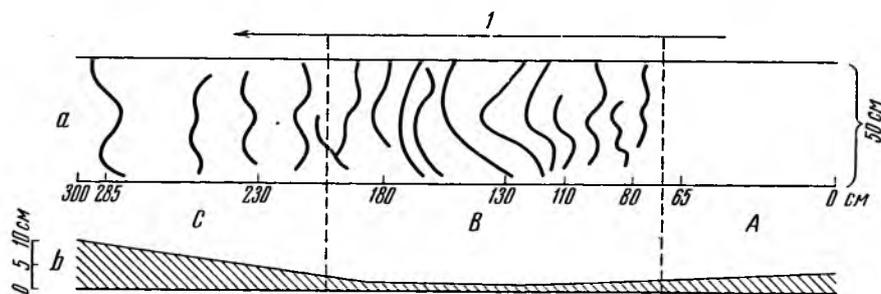


Рис. 2. Образование ветровой ряби на поверхности искусственной площадки с песком в ПАУ-2 ($v=8 м/сек$). Составлена М. Е. Бельгибаевым
 А — нейтральная микрizona затишья; В — микрizona выдувания; С — микрizona аккумуляции. 1 — направление воздушного потока; а — вид площадки сверху; б — вид площадки сбоку (профиль)

Пропорциональность твердого расхода потоков кубу скорости ветра отмечали R. Bagnold (1938), А. К. Дюнин (1963), Б. А. Федорович (1969) и др.

Другие эксперименты — по нахождению связи скорости перемещения ветровой ряби со средней скоростью ветра — проводились О. Е. Семеновым в аэродинамической трубе для изучения дефляции почв Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института (КазНИГМИ). Эта труба незамкнутого типа с закрытой рабочей частью и всасывающим осевым вентилятором. Общая длина установки около 6 м, длина (без коллектора) прямоугольного канала — 3,5 м. Сечение — $0,15 \times 0,25 м$. Рабочий участок канала может использоваться на протяжении 1,85 или 3 м. На входе в канал сразу после коллектора и на выходе из канала перед циклоном для осаждения частиц твердой фазы установлены спрямляющие решетки (хонейкомбы) для улучшения местных параметров поля рабочего участка трубы.

Воздух из циклона через диффузор выбрасывается вентилятором типа 06-320, приводимым во вращение асинхронным электродвигателем АОЛ 11-2 с номинальной мощностью на валу 0,18 кВт и числом оборотов в минуту — 2800. Максимальная скорость потока в трубе около 9 м/сек. Конструкция трубы позволяет плавно регулировать скорость ветра с пульта управления. Для измерения скорости ветра используются микроанометры ММН с трубками Прандтля. На высоте 15 см непрерывные наблюдения можно вести и по анемометру с тахогенераторным датчиком.

Для опытов были использованы золотые мелкопесчаные наносы на супесчаных сероземах Алма-Атинской области, распределение частиц по размерам которых аппроксимируется логарифмически-нормальным законом (Семенов, 1970) с параметрами распределения $x_0=88 мкм$ и $b=0,12$. Масса частиц размером менее 140 мкм (0,14 мм) достигает у него 95%. Эксперимент проводился следующим образом.

В лоток, устанавливаемый в рабочей части канала, насыпался песок и тщательно разравнивался. Лоток при установке в канале погружается в его дно таким образом, что уровень песка совпадает с поверхностью дна канала. После включения вентилятора и непродолжительной продувки образца в потоке со скоростью выше критической образовывалась ветровая рябь, по своим параметрам аналогичная естественной. Прозрачные потолок и стенки рабочей части канала позволяли в ходе эксперимента измерять пройденный гребнем ряби путь и таким образом вести наблюдения за изменением скорости перемещения песчаных волн при различных значениях скорости ветра.

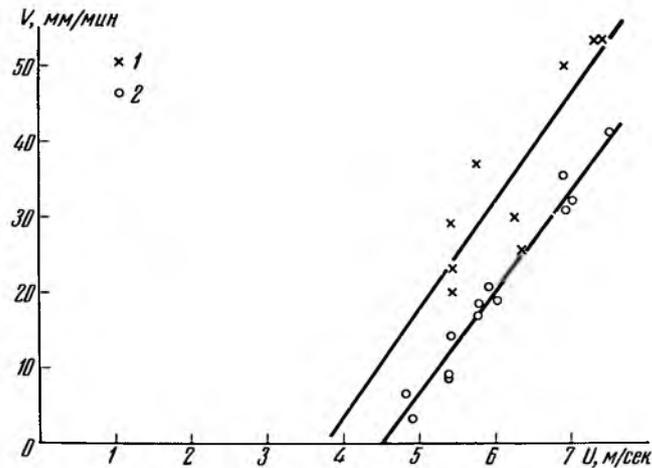


Рис. 3. Зависимость скорости перемещения гребня ряби (v) от средней скорости ветра (u) на уровне 0,15 м для участков длиной 3 м (1) и 1,85 м (2)

Опыты проведены для двух размеров рабочих участков трубы — длиной 3 и 1,85 м. Результаты измерений приведены в табл. 2 и представлены на рис. 3. Полученные зависимости скорости перемещения

Таблица 2

Скорость передвижения ветровой ряби (мм/мин) и средняя скорость ветра (м/сек) на высоте 0,15 м в аэродинамической трубе

Длина рабочего участка трубы 1,85 м													
Скорость движения ряби	6,2	3,0	14,4	8,4	8,8	17,2	18,8	20,8	18,4	32,6	30,6	35,3	41,0
Скорость ветра	4,8	4,9	5,4	5,4	5,4	5,8	6,0	5,9	5,8	7,0	6,9	6,9	7,5
Длина рабочего участка трубы 3 м													
Скорость движения ряби	20,0	29,2	23,4	25,4	30,0	37,0	53,5	53,5	50,0				
Скорость ветра	5,4	5,4	5,4	6,4	6,2	6,0	7,4	7,4	6,9				

ряби v (мм/мин) от средней скорости ветра u (м/сек) достаточно тесные и носят в исследованном интервале скоростей потока линейный характер. Уравнения связи имеют следующий вид:

для участка длиной 1,85 м $v = 13,2$, $u = 95,5$ и
 для участка длиной 3 м $v = 14,2$, $u = 53,3$

Коэффициенты корреляции равны соответственно $0,9 \pm 0,02$ и $0,85 \pm 0,05$.

Приведенные зависимости по своему характеру существенно отличаются от степенного уравнения Е. М. Минского (1935):

$$v = K(u - u_0)^\alpha,$$

где u_0 — скорость ветра, при которой образуется рябь, $\alpha = 2,247$.

Причиной столь значительного расхождения может быть ряд недостатков эксперимента Е. М. Минского, отразившийся на результатах, на которые он указывает в заключении своей статьи. Расширяющееся сечение трубы изменяло скорость ветра над рабочим участком в 1,6 раза, поэтому и длина волны ряби и скорость перемещения гребней в различных участках трубы были неодинаковыми. Автору приходилось все получаемые значения осреднять и относить к скорости, измеряемой всегда в одном и том же месте, что приводило, естественно, к большим ошибкам.

Таким образом, подтверждается вывод Е. М. Минского об ограниченности интервала скоростей ветра, при которых образуется и существует ветровая рябь. Полученные данные указывают на линейный вид зависимости скорости перемещения ряби от скорости ветра в исследованном интервале ее значений и на зависимость от величины расхода твердой фазы при увеличении длины рабочего участка аэродинамической трубы.

ЛИТЕРАТУРА

- Арманд А. Д. Модели и информация в физической географии. М., «Знание», 1971.
- Белостоцкий И. Наблюдения над знаками ряби. Изв. Всес. геогр. о-ва, 1940, т. 72, вып. 2.
- Бельгибаев М. Е., Паракшина Э. М. Ветровая эрозия почв на территории совхоза им. Белинского Кустанайской области и меры борьбы с ней. В сб.: Эрозия почв в Казахстане и борьба с ней. Тр. Ин-та почвовед. АН КазССР, т. 19. Алма-Ата, «Наука», 1970.
- Бочаров А. П. Измерение ветроустойчивости почв полевой аэродинамической установкой. — Вестн. с.-х. науки, 1963, № 5, Алма-Ата.
- Вейсов С. Методика изучения первичных стадий эолового рельефа подвижных песков. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1968, № 3.
- Великанов Н. А. Гидрология суши. Л., Гидрометеиздат, 1964.
- Добрин Л. Г. Эоловая песчаная рябь, ее строение и движение. Изв. АН ТуркмССР, 1959, № 4.
- Дюнин А. К. Механика метелей. Новосибирск, СО АН СССР, 1963.
- Знаменский А. И. О механизме образования некоторых форм эолового рельефа песчаных пустынь и защите сооружений от песков. — Изв. Туркм. фил. АН СССР, 1950, № 1.
- Лопатин Г. В. Наносы рек СССР (образование и перенос). М., Географгиз, 1952.
- Маккаев Н. И., Хмелева Н. В. и др. Экспериментальная геоморфология, М., МГУ, 1961.
- Минский Е. М. О движении песчаных волн под действием потока жидкости. — Тр. Центр. ин-та эксперим. гидр. и метеорол., вып. 2 (44), М., 1935.
- Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л., Гидрометеиздат, 1966.
- Петров М. П. Рельеф барханных песков пустынь и закономерности его формирования. — В сб.: Проблемы геоморфологии, вып. 39. (Тр. ин-та геогр. АН СССР). М.—Л., 1948.
- Петров М. П. Подвижные пески пустынь Союза ССР и борьба с ними. М., Географгиз, 1950.
- Семенов О. Е. О распределении почвенных частиц по размерам на юге Казахстана вследствие эоловых процессов. — Тр. КазНИГМИ, вып. 36. Л., Гидрометеиздат, 1970.
- Соколов Н. А. Дюны, их образование, развитие и внутреннее строение, СПб., 1884.
- Федорович Б. А. Вопросы происхождения и формирования песчаного рельефа пустынь. В сб.: Проблемы геоморфологии, вып. 39. (Тр. Ин-та геогр. АН СССР). М.—Л., 1948.

- Федорович Б. А. Рельефообразующие процессы.— В кн.: Казахстан. М., «Наука», 1969.
- Шуляк Б. А. Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. М., «Наука», 1971.
- Щусев П. В. Описание лабораторных опытов над образованием и деформациями песчаных барханов (сост. по докл. проф. К. П. Боклевского).— В сб.: Борьба с песчаными наносами на железных дорогах, вып. 90, М., НТК НКПС, 1928.
- Wagnold R. A. The Measurement of Sand Storms Proc. of the Royal Soc. of London, v. 167, ser. A., 1938.
- Kindl E. M., Bücher W. H. Ripple mark and its interpretation: Treatise on Sedimentation. Baltimore, Williams and Wilkins, 1926.

Институт почвоведения
АН КазССР

Поступила в редакцию
15.II.1971

SOME DATA ON WIND RIPPLES IN AERODYNAMIC PIPES

M. E. BEL'GIBAEV and O. E. SEMENOV

Summary

Presented are data on the conditions of formation and existence of aeolian ripples in aerodynamic pipes of two designs. The data agree with the earlier conclusion drawn by E. M. Minsky on the limited range of wind velocities at which aeolian ripples form and exist. In the area of aeolian ripples the rate of movement of their crests linearly depends on the wind velocity and the size of delivery of the solid phase when the length of the working part of the aerodynamic pipe increases.
