

Гидротехника и Мелиорация



3

МАРТ

1982

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
МИНИСТЕРСТВА СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА СССР
И МИНИСТЕРСТВА МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

ОСНОВАН В 1949 ГОДУ
МОСКВА „КОЛОС“

В НОМЕРЕ:

Эффективность мелиорации земель в Брестской области

Планирование социально-экономического развития
проектной организации

Средства оперативного управления строительством

Земснаряды на Каршинском магистральном канале

Защита почв от эрозии и борьба с оврагами

Технология строительства дренажа с применением рулонных ЗФМ

Оструктурирование торфяных почв глубокой вспашкой

Окультуривание осушенных земель в совхозе «Детскосельский»

Производство кормов на мелиорированных землях

Выбор очередности переустройства мелиоративных объектов

Магнитная обработка воды: теория и практика

Мелиорация земель в ФРГ

УДК 551.578

ОЦЕНКА КАПЕЛЬНО-УДАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЯ

В. М. МОСКОВКИН

Расчет капельно-ударных характеристик искусственного дождя очень важен при оценке разрушения и уплотнения почвы и др. К таким характеристикам относятся кинетическая энергия, количество движения, сила удара и давление в момент удара о поверхность почвы. Точный их расчет может быть сделан только при знании спектра капель искусственного дождя. Общий подход к определению кинетической энергии дождя путем суммирования по различным градациям спектра капель рассмотрен в работе [10]. Для определения количества капель в каждой градации используется измерительная аппаратура [9]. При ее отсутствии расчет капельно-ударных характеристик можно проводить по известному процентному спектру и интенсивности дождя. Этот способ расчета удобен для построения совмещенных графиков спектра и капельно-ударных характеристик, хорошо характеризующих спектрально-энергетическую структуру дождя.

При расчете характеристик по процентному спектру все капли по размерам, выпадающие в единицу времени на единичную площадь, разбиваем на m интервалов (градаций) с постоянной длиной интервала \bar{d} . Для каждого интервала $[(i-1)\bar{d}, i\bar{d}]$ находим средний диаметр капель $d_i = [(2i-1)/2]\bar{d}$ и соответствующую ему конечную скорость падения капель v_i . Далее находим капельно-ударную характеристику отдельной капли M_{di} . Процентное число капель, лежащих в интервале $[(i-1)\bar{d}, i\bar{d}]$, обозначим через P_i . Общее число капель N , выпавших за 1 мин на площадь 1 м² (плотность потока капель), определим по формуле

$$N = \frac{600}{\pi} \cdot \frac{10^6 I}{\bar{d}^3 \sum_{i=1}^m \left(\frac{2i-1}{2}\right)^3 P_i}, \quad (1)$$

где I — интенсивность дождя, мм/мин.

Тогда число капель, лежащих в рассматриваемом интервале, составит $P_i N / 100$. Для определения плотности потока капельно-ударной характеристики M воспользуемся выражением

$$M = \frac{48 \cdot 10^6 J}{\pi \bar{d}^3} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m M_{di} P_i}{\sum_{i=1}^m (2i-1)^3 P_i}. \quad (2)$$

В случае расчета плотности потока кинетической энергии с учетом

$$E_{di} = \frac{\pi}{12} 10^{-6} d_i^3 \cdot v_i^2 \text{ получим}$$

$$E = 0,5J \sum_{i=1}^m (2i-1)^3 v_i^2 P_i / \sum_{i=1}^m (2i-1)^3 P_i. \quad (3)$$

Для однородного искусственного или естественного дождя, состоящего из капель размером d , $E = 0,5Iv^2(d)$.

Аналогично формуле (3) могут быть получены и формулы для расчета остальных капельно-ударных характеристик. При этом необходимо учитывать, что существует два вида формул для определения силы удара F и давления D отдельной капли — для упругого и неупругого удара. В первом случае в качестве одного из сомножителей в формулы входит скорость звука в воде (C); $F, D \sim Cv$, во втором — $F, D \sim v^2$ (где \sim знак пропорциональности). В качестве расчетных формул для определения характеристик искусственного дождения будем пользоваться формулами для неупругого удара [7]. Поскольку характер удара зависит от физических свойств почвы и конечной скорости падения капли, можно полагать, что удар капель по рыхлой почве будет неупругим.

Конечную скорость капли, падающей с высоты h с начальной скоростью $v_0(d)$, определим по следующей формуле, полученной в результате решения уравнения движения капли в поле силы тяжести

$$v_h(d) = v_\infty(d) \times \sqrt{1 - \left(1 - \frac{v_0^2(d)}{v_\infty^2(d)}\right) \exp\left(-\frac{2gh}{v_\infty^2(d)}\right)}, \quad (4)$$

где $v_\infty(d)$ — конечная скорость падения капли при $h = \infty$ (практически при $h > 11$ м), то есть конечная скорость падения капель естественного дождя.

Максимальные начальные скорости вылета струи, которые обеспечиваются современными насадками, могут достигать

◆ Московкин Владимир Михайлович, младший научный сотрудник лаборатории гидравлических исследований ВНИИ по охране вод.

$v_0(d) = 30 \dots 40$ м/с. Анализ формулы (4) при этих скоростях и $h \approx 1$ м при $d \leq 0,3$ мм показывает, что $v_h(d) \approx 0$, хотя по имеющимся экспериментальным данным [11] в этом случае скорости должны быть порядка 15...30 м/с. При более крупных каплях $0,4 \text{ мм} \leq d \leq 0,8$ мм и тех же начальных скоростях расхождения с экспериментом более значительные (200...400 %). При меньших начальных скоростях (порядка 10 м/с) расхождения уменьшаются. С учетом этого формулу (4) можно рекомендовать для расчетов при относительно небольших (порядка 0...10 м/с) начальных скоростях движения капли и при $d \geq 0,5$ мм.

По данным Ченга Ланга [11], максимальный размер капель, которые не разрушаются в воздухе при начальных скоростях 30 м/с и 40 м/с, соответственно равен 0,68 и 0,4 мм. При максимальных начальных скоростях (порядка 20 м/с) разбрызгивания каплей, которые обеспечивает современная дождевальная техника, их размер не превышает 1 мм.

При $v_0 = 20$ м/с и $d = 1$ мм по графику, приведенному в работе [11] при $h = 121,9$ см, получим конечную скорость падения капли около 14,5 м/с. Капли $d < 1$ мм имеют меньшую конечную скорость. Таким образом, $v_h = 14 \dots 15$ м/с являются максимально возможными конечными скоростями падения каплей при дождевании с высотой $h = 1 \dots 1,5$ м. При увеличении высоты дождевания полученный интервал скоростей будет смещаться в сторону меньших скоростей. Отсюда следует, что максимально возможное капельно-ударное воздействие искусственного дождя на почву следует оценивать по полученному интервалу скоростей 14...15 м/с. Например, при расчете кинетической энергии (плотности потока кинетической энергии) однородного дождя, приведенной к миллиметровому слою осадков, будем иметь $E = E/I = 0,5v_h^2 = 98 \dots 112,5$ Дж/м²·мм, что более чем в 2 раза превышает максимально возможную кинетическую энергию естественного дождя $E = 42,2$ Дж/(м²·мм).

При небольшом размере капель разбрызгивание почвы будет незначительным, но будет возникать большое давление ($D = \rho v_h^2 = 2 \cdot 10^5$ Па) при ударе каждой капли о почву, которое будет сильно нарушать ее структуру.

Этот случай дождевания рассмотрен как наиболее неблагоприятный по воздействию на почву. Обычно дождеватели насаdkового типа направлены вверх под некоторым углом, в связи с чем для определения характеристик представляет интерес лишь высота, с которой выпадает основная масса каплей дождя с нулевой вертикальной скоростью (это в большей степени относится к средне- и дальнеструйным дождевальным установкам). Для расчета конечной скорости движения каплей можно использовать формулу (4) при $v_0 = 0$ [10] или формулы, приведенные в работах [2, 9].

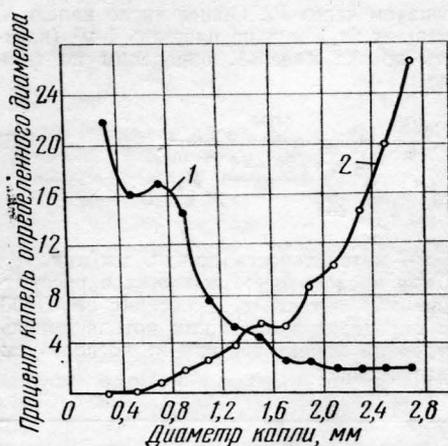
Экспериментальные исследования показали [1], что сила удара каплей при работе дальнеструйных дождевателей по мере уве-

личения их мощности практически не изменяется, что свидетельствует о возможности принять за основу при расчетах капельно-ударных характеристик конечную скорость падения каплей естественного дождя. Данные о конечных скоростях имеются в специальной литературе [5]. Аппроксимируя квадраты этих скоростей, получим следующее выражение

$$v_{\infty}^2(d) = 84,4[1 - \exp(-0,155 d^2)]. \quad (5)$$

Рассмотрим пример расчета энергетических и силовых характеристик дождевальной установки Нептун-2ДД-500, параметры которой определены при различных режимах ее работы [1]. Так, при $Q = 302$ л/с и средней эффективной интенсивности дождя $I = 0,38$ мм/мин средний диаметр наиболее крупных концевых каплей равен $d = 4,2$ мм. По формулам для определения значения энергии и силы удара каплей однородного дождя (с учетом данных таблицы [5] или формулы 5) получим $E = 15,3$ Дж/(м²·мин), $F = 7300$ Н/м²·мин. Такой дождь окажет интенсивное воздействие на почву.

Рассмотренную в начале статьи методику оценки капельно-ударных характеристик удобно использовать для построения совмещенных графиков спектра и капельно-ударной характеристики. Покажем это на примере кинетической энергии. В качестве исходного возьмем спектр, полученный при испытании дождевальной установки «Фрегат» [6] (рис. 1). Средняя интенсивность дождевания принята равной $I = 0,55$ мм/мин, а средняя высота, с которой выпадала основная масса каплей дождя с нулевой вертикальной скоростью, — 6 м [9]. Конечная скорость для каждой градации каплей v_i определялась по формуле (4) при $h = 6$ м, $v_0 = 0$. На основе результатов проведенного расчета построена кривая кинетической энергии каплей дождя (рис. 1). Кривая спектра, осредненная с 1 по 16 опору, в целом убывающая функция от диаметра каплей. В то же время кривая кинетической энергии возрастает и особенно сильно в крупнокапельной области спектра.



Совмещенный график спектра и кинетической энергии осадков дождевальной установки «Фрегат»: 1 — кривая спектра; 2 — кривая кинетической энергии

В этой области $E(d)$ растет как $d^3 v^2(d)$ или d^4 , так как $v^2(d) \sim v_\infty^2 \sim d$. Кривая энергии в мелкокапельной области почти не зависит от изменений кривой спектра, а в крупнокапельной области зависимость кривых друг от друга достаточно выражена. Это связано со структурой формулы для определения $E(d)$, являющейся быстрорастущей функцией от диаметра капель. Анализируя кривые, представленные на рис. 1, можно сказать, что наиболее сильное воздействие на почву оказывают капли размером более 1 мм, что согласуется с известными агротехническими требованиями к дождевальным установкам. Важно отметить, что области спектра с большим процентом мелких капель ($d < 1$ мм) будут составлять незначительную долю общей энергии дождя.

В целом рассматриваемый вариант дождевания обеспечивает дождь большой кинетической энергии: $E = 10,46$ Дж/(м²·мин) и $\bar{E} = E/I = 19,02$ Дж/(м²·мм).

Средневзвешенный по объему диаметр капель равен

$$d_{\text{ср. вз.}} = \sqrt[3]{\frac{\sum P_i d_i^3}{100}} = 1,26 \text{ мм}$$

и соответствует энергии 10...11 Дж/(м²·мм) однородного искусственного дождя. Диаметр каплей эквивалентного по энергии однородного искусственного дождя равен 1,92 мм (расчет изменения кинетической энергии осадков по длине дождевальной установки «Фрегат» приведен в работе [3]).

В процессе исследований установлена связь между разбрызгиванием почвы R и капельно-ударными характеристиками (преимущественно кинетической энергией дождя). Поскольку разрушение и разбрызгивание почвы зависят от спектра капель, значение R следует определять для каждой градации каплей отдельно и общее разрушение находить путем суммирования по всем градациям [7]. В настоящее время имеется много зависимостей $R = f(E)$ для разных типов почв и условий эксперимента, но ни одна из них не может быть универсальной из-за отсутствия сопряженных исследований по влиянию прочностных свойств почвы на ее разрушение при капельно-ударном воздействии. При решении этой задачи в связи с трудностью теоретического анализа процессов капельно-дождевой эрозии основная роль должна быть отведена эксперименту.

Несколько слов об исследованиях влияния дождя, создаваемого дождевальной техникой серийного производства, на свой-

ства почвы. По данным наблюдений, дождевальные установки ДШ—25/30, КДУ-55М, «Фрегат», ДДА-100М, «Волжанка», УДС-25, «Сигма» за вегетационный период с 12 июля по 13 сентября, в течение которого выпало 18 дождей, произвели разрушение почвы R меньше, чем при воздействии атмосферных осадков соответственно в 9,7; 5,2; 1,6; 1,5; 1,4; 1,2 раза. В то же время установки ДА-2, ПУК-3, ДДН-45, ДДН-70 произвели разрушение почвы соответственно в 1,6; 2,1; 2,7; 3,2 раза больше, чем атмосферные осадки [9]. Это свидетельствует о необходимости использования последних лишь при условии тщательного учета местных почвенных, растительных, геоморфологических и других характеристик орошаемых сельскохозяйственных водосборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бредихин Н. П., Ревенко П. А., Циприс Д. Б., Пилентиков В. В., Мосляков Б. Ф. Высокоскоростные дальнеструйные дождевальные машины. — Гидротехника и мелиорация, 1979, № 10.
2. Исаев А. П. Гидравлика дождевальных машин. М.: Машиностроение, 1973.
3. Краснощекоев В. С. Энергетическая оценка качества дождя машин «Фрегат» и «Волжанка». В сб.: Новое в технике и технологии полива. Тр. ВНИИГиМ, вып. 12. М., 1979.
4. Листопад И. Е., Чижиков Г. И. К вопросу скорости каплей искусственного дождя и силы их удара. — Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1970, № 10.
5. Литвинов И. В. Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеоздат, 1974.
6. Москвичев Ю. А., Хайдарова Г. Я., Краснощекоев В. С. Агрооценка дождевальной машины «Фрегат». — Гидротехника и мелиорация, 1975, № 4.
7. Московкин В. М., Гахов В. Ф. Физические аспекты капельно-дождевой эрозии. — Почвоведение, 1979, № 12.
8. Сластухин В. В. К расчету силы удара капли дождя. В сб.: Проблемы географии Молдавии. Вып. 6. Кишинев, 1971.
9. Сластухин В. В., Гаврилица А. О. Воздействие искусственного дождя и атмосферных осадков на поверхность водосбора. В сб.: Гидрология малых водосборов. Кишинев: Штиинца, 1978.
10. Швобс Г. И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Л.: Гидрометеоздат, 1974.
11. Cheng Lung. Dynamic spreading of drops impacting onto a solid surface. Ind. and Eng. Chem. Process. Des. and Devel., vol. 16, N 2, 1977.