МИНИСТЕРСТВО ТОПЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ "ЕЭС РОССИИ"

МЕТОДИКА
РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ ЗОЛООТВАЛА ТЭС

МЕТОДИКА
ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО ШТАБЕЛЯ ТЭС

ОАО «УралОРГРЭС»

Екатеринбург 1998

МИНИСТЕРСТВО ТОПЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ "ЕЭС РОССИИ"

М Е Т О Д И К А
РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ ЗОЛООТВАЛА ТЭС

МЕТОДИКА
ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО ШТАБЕЛЯ ТЭС

ОАО «УралОРГРЭС»

Екатеринбург 1998

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

М Е Т О Д И К А РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ ЗОЛООТВАЛА ТЭС..... 3
1. Введение..... 6
2. Механизм и основные показатели ветровой эрозии золошлакоотвала ТЭС..... 7
3. Характеристика золоотвала как площадного пылящего объекта..... 15
4. Расчётная оценка ветровой эрозии золошлакоотвалов..... 17
Приложения:
1. Определенние удельной сдуваемости..... 23
2. Алгоритм и пример расчетного определения ветровой эрозии золошлакоотвала..... 24
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО ШТАБЕЛЯ ТЭС..... 31
1. Введение 34
2. Механизм ветровой эрозии угольного штабеля 35
3. Расчетный и экспериментальный методы оценки ветровой эрозии и пыления угольного штабеля..... 36

М Е Т О Д И К А
РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ ЗОЛООТВАЛА ТЭС

РД

Разработана	Открытым акционерным обществом «Предприятие по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей УралОРГРЭС"
Разработчики	Шульман В.Л., к.т.н., Вишня Б.Л., Полуянова В.И., Кобцева С.А. (ОАО "УралОРГЭС") Неупокоев В.А. (ВНИИОГР) Усков И.Б., Козырева Л.В. (Агрофизический институт РАСХН)
Согласовано:	
Утверждено:	Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» Первый заместитель начальника Департамента стратегии развития и научно- технической политики РАО «ЕЭС России» _____А.П. Берсенев «15» 12 1998 г.

МЕТОДИКА РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ И ПЫЛЕНИЯ ЗОЛОШЛАКООТВАЛА ТЭС

РД

Срок действия установлен
с _____
по_____

Настоящая методика предназначена:

- работникам ТЭС и энергетических объединений для оценки воздействия золошлакоотвалов ТЭС на состояние окружающей природной среды и разработки мероприятий по ограничению ее загрязнения, а также для определения валового выброса пылевых частиц в атмосферу с указанных поверхностных источников с целью формирования отчётности по форме 2-тп (воздух) и расчётов платежей за выбросы;
- работникам проектных организаций при разработке прогнозных оценок воздействия новых золошлакоотвалов на состояние воздушного бассейна и оценки эффективности принимаемых проектных технологических и природоохранных решений;
- работникам органов охраны природы и других контролирующих органов для оценки загрязняющих свойств объектов ТЭС и эффективности природоохранной деятельности ТЭС, уточнения размера платы за выбросы в атмосферу, экологической экспертизы создаваемых и реконструируемых объектов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из существенных путей воздействия ТЭС на окружающую природную среду является вынос в атмосферу пылевых частиц с поверхности золошлакоотвалов ТЭС в результате их ветровой эрозии и последующее их осаждение на почве. Пыление это возникает в результате несовершенства проектных решений и технологии складирования золошлаков, нарушения правил эксплуатации указанных объектов, являющихся источником неорганизованных выбросов загрязнителей в атмосферу.

Оценка пылевых выбросов с поверхности золошлакоотвалов ТЭС может быть дана различными методами: экспериментальными, аналоговыми, расчетными. Наиболее полная и достоверная оценка пылящих свойств конкретных существующих золоотвалов устанавливается полевыми исследованиями при методически правильной их организации, которые требуют привлечения высококвалифицированных научных сил, использования специальной аппаратуры. Универсальным способом оценки пылящих свойств золошлакоотвалов может служить расчетный метод, основанный на определенной физической модели процесса ветровой эрозии, рассматриваемой ниже.

Настоящая методика расчетной оценки ветровой эрозии золошлакоотвалов разработана на основе специально организованных теоретических, лабораторных и полевых исследований, обобщения данных выполненных ранее наблюдений, исследований, проектных разработок в отечественной и зарубежной энергетике, смежных отраслях.

2. МЕХАНИЗМ И ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ЗОЛОШЛАКООТВАЛА ТЭС

2.1. Гидрозолошлакоотвалы ТЭС являются хранилищем отходов энергетического производства - золы и шлака, которое по мере заполнения подлежит консервации или рекультивации и передаче в хозяйственное пользование. В сухие периоды года большинство золошлакоотвалов (кроме случаев складирования цементирующихся зол) могут оказаться источником интенсивного пыления в результате ветрового воздействия. Ветровая эрозия золошлаковых полей представляет собой разрушение сложившейся в процессе складирования и статического хранения структуры дисперсной слабосвязанной обезвоженной золы уноса ТЭС под воздействием ветровоздушного потока. Она определяется характером и интенсивностью воздействия ветрового потока, свойствами складируемого материала, технологией складирования, а также конструкцией объекта.

2.2. Можно выделить три составляющих процесса ветровой эрозии:

- отрыв и взлет частицы с поверхности,
- перемещение ее в запыленном потоке над поверхностью золошлакового поля,
- рассеивание золовых эродированных частиц за пределами золоотвала после схода пылевого облака с дамбы.

2.3. Воздействие ветровоздушного потока на каждую отдельную частицу на поверхности слоя связано с несколькими одновременно действующими механизмами - лобовое аэродинамическое давление, побуждающее к сдвигу по направлению ветра вдоль поверхности, перепад статического давления, возникающий при обтекании частицы и создающий подъемное усилие, турбулентная диффузия в ветровом потоке, создающая переменные пульсирующие по величине и направлению усилия на частицу и ослабляющие гравитационные и адгезионные связи частицы со слоем.

2.4. <u>Сдвиговая, или динамическая, скорость потока</u> U_* является важнейшим параметром, характеризующим условия ветровой эрозии поверхности пылевидного материала и определяющим величину создаваемого потоком усилия отрыва частицы от поверхности (либо сдвига ее по поверхности). Непосредственно этот параметр характеризует степень интенсивности турбулентного пульсационного движения в пограничном слое. Значение U_* определяется из логарифмического уравнения Кармана-Прандтля, учитывающего высотный градиент скорости незапыленного ветровоздушного потока, связанный с тормозящим действием подстилающей поверхности:

$$U_Z/U_* = 1/k \cdot \ln(Z/d_п) + 8,5 \qquad (2.1)$$

где U_Z - скорость ветра на высоте флюгера Z, м/с,

k - постоянная Кармана (~ 0,4),

$d_п$ - диаметр частицы, м;

Z - высота установки флюгера, м

Значения U_* для золовых частиц с агрегатной плотностью ρ_a=2,6 г/см^3 показаны на графике 1.

Пороговая (минимальная) динамическая скорость U_{*t}, м/с, соответствующая началу пыления (подъему частиц), определяется по по графику на рис. 2 или по формуле:

$$U_{*t} = A\,(\delta\, g\, d_П)^{0,5} \qquad (2.3)$$

$$\delta = \rho_П/\rho_В$$

где: $\rho_В$ - плотность воздуха, кг/м^3;

$\rho_П$ - агрегатная плотность пылевых частиц, кг/м^3;

g - ускорение силы тяжести, м/с^2;

A - эмпирический коэффициент - 0,08-0,12,

Для каждого конкретного случая складирования золошлаков существует минимальная скорость ветра U_{KP} на уровне флюгера, соответствующая U_{*t}, при которой начинается пыление поверхности золоотвала. Эта величина может быть определена расчетным путем исходя из зависимости (2.1) по формуле:

$$U_{KP} = [2,5 \cdot \ln(Z/d_n) + 8,5] \cdot U_{*t} \qquad (2.4),$$

(которой соответствует график на рис.1), либо наблюдениями по данному объекту.

2.5. Поведение золошлаковых частиц в слое при продольном ветровом воздействии определяется физическими свойствами материала и индивидуальными свойствами каждой частицы (размер, плотность, конфигурация, парусность), условиями ее физико-химического воздействия в слое со смежными частицами (адгезионные свойства, химическое воздействие), а так же характером, структурой слоя частиц (влажность, гранулометрический состав) и условиями его формирования (насыпной, намывной).

2.6. Влияние гранулометрического состава отложений на пылящие свойства слоя носит экстремальный характер. Наибольшая сдуваемость отмечается для слоя с преобладанием частиц 0.05-0.2 мм. Малопылящей является поверхность золошлаковых отложений, образованная частицами d_n<0.05 мм, что обусловленно взаимодействием между частицами при их более плотной упаковке. С увеличением доли частиц размером более 0.25-0.3 мм (за счет фракционирования при намыве слоя, либо по мере эрозионного истощения поверхности сухого участка) интенсивность сдува золошлаков резко снижается.

2.7.Определяющим фактором химического взаимодействия золовых частиц с образованием различной степени устойчивости сцементированных конгломератов является содержание CaO. При CaO < 10% в золоотвале при намыве и хранении не происходит структурной перестройки зернового состава поступающих золошлаков. При CaO = 10-25 % отмечается частичная структурная перестройка, приводящая к образованию на золошлаковом поле локальных участков слабо сцементированных отложений. Золошлаки с CaO >

25 % самоцементируются в монолит, достаточно стойкий к комплексу атмосферных воздействий

2.8. Интенсивность ветровой эрозии поверхности зависит от способа формирования слоя, для намытого слоя золошлакоотвала она на порядок ниже, чем для насыпного и неуплотненного слоя. Это указывает на существенное различие условий пыления сухих свеженамытых участков и зон вторичного пыления, поверхность которых образуется осажденными эродированными частицами.

2.9.Капиллярное увлажнение поверхности слоя, орошение в качестве способа пылеподавления, осадки, талые воды, изменяя влажность материала, существенно сказываются на пылении поверхности золоотвала. Пыление характерно для участков, где влажность слоя составляет 1-3%(воздушно-сухой материал), и полностью исключается при влажности более 6-7%

2.10. Интегральной характеристикой эродируемости частиц является удельная сдуваемость материала m_0, которая определяется экспериментальным путем продувками в аэродинамической трубе проб золы, отобранных на золоотвале, с моделированием условий намыва золы. Для приближенной оценки порядка величины m_0 может служить эмпирическая зависимость

$$m_0 = c \cdot U_*\left(U_*^2 - U_{*1}^2\right), \text{ г/м}^2\text{с} \qquad (2.5)$$

где c - универсальная постоянная c = 100

2.11. Возможны три формы движения эродированных пылевых частиц под действием воздушного потока - сальтация (скачкообразное перемещение), во взвешенном состоянии, путем безотрывного перемещения частиц по поверхности (волочение, перекатывание). Зола, сдуваемая с поверхности золоотвала и выносимая за его пределы, - полидисперсная, включает пылевые частицы от субмикронных до 500 мкм (витающие - размером до 40 мкм и гравитирующие, которые участвуют в сальтирующем движении, - размером до 500 мкм). Крупные частицы размером свыше 500 мкм могут перемещаться по поверхности под действием лобового усилия воздушного потока безотрывно. Эти частицы практически не выносятся за пределы золошлакового поля. Витающие частицы следуют за ветровым потоком и рассеиваются на значительном удалении от золошлакоотвала. Перемещение частицы во взвешенном состоянии происходит в том случае, когда конечная скорость падения частицы (определяемая размером, формой, плотностью частицы) меньше пороговой динамической скорости для данной частицы

При сальтации частица получает от воздушного потока начальный подъемный пульс и затем перемещается вниз под воздействием силы тяжести и силы трения о воздух. Критерием разделения процессов сальтации и переноса взвеси служит отношение динамической скорости U_{*1} к скорости гравитационного оседания частиц V_1. Граничный размер пылевой частицы d_{1r}

(минимальный размер сальтирующей частицы), разделяющий витающие и сальтирующие частицы , соответствует значению комплекса

$$U_{*t} / V_t = 1{,}0 \qquad (2.6)$$

Значение $d_{гр}$ может быть определено по графику на рис. 3.

2.12. Каждому значению скорости ветра на высоте флюгера U_Z соответствует предельный (максимальный) размер эродируемой частицы d_{max}, определяемый из соотношения $U_* = U_{*t}$ по графику на рис.4.

2.13. Высота подъема эродированной частицы h (без учета возможного воздействия восходящих воздушных потоков и турбулентных крупномасштабных вихревых образований) определяется по формуле:

$$h = \frac{U_{эф}^2}{g} \cdot \frac{1}{a}\left[\left(1 + \frac{1}{a}\right) \cdot \ln(1 + a) - 1\right], м \qquad (2.7)$$

$$a = 0.0383 \frac{U_* \cdot U_{эф}}{\sigma \cdot d_п}$$

где $U_{эф}$ – скорость ветра на уровне оси пылевого облака, принимаемая равной 0,8 U_Z.

2.14. Пролет сальтирующей частицы над золошлаковым полем определяется зависимостью:

$$l_п = \frac{h}{V_t} U_{эф}, м \qquad (2.8)$$

2.15. На длине перелета одиночной пылевой частицы от наветренной границы пылящего участка $L_{пр.}$, имеет место нарастание массы эродированных частиц, переносимых ветровоздушным потоком, здесь отсутствует осаждение оторванных от поверхности частиц. На последующем участке процесс выдувания частиц из слоя сопровождается переходом эродированных сальтирующих частиц из потока на поверхность, которые затем участвуют во вторичном пылении. Условия вторичного пыления – отрыва от слоя осаждаемых эродированных частиц – существенно отличны от характера первичного пыления – отрыва пылевых частиц от намытого слоя. Интенсивность сдува частиц при вторичном пылении существенно выше. Поэтому можно считать, что весь эродированный материал первичного сдува, включая витающие и сальтирующие частицы (со всей пылящей неэкранированной прудом поверхности золоотвала) выносится к границе золошлакового поля (к ограждающей дамбе отвала). Участок непосредственно перед ограждающей дамбой, сама дамба, ее низовой откос, дренажные и нагорные канавы являются зоной обеспыливания ветрового потока, в которой действуют гравитационные силы и турбулентная диффузия.

2.16. Перенос золовых частиц, поступающих в атмосферу с открытой поверхности складируемого материала, и переход их на подстилающую по-

верхность в прилежащей зоне осуществляется по иному механизму, нежели процессы рассеивания в атмосфере твердых частиц с дымовыми газами ТЭС и твердофазных выпадений из дымового факела

Обеспыливание ветровоздушного потока описывается эмпирической экспоненциальной зависимостью:

$$\mu_X = \mu_0 e^{-\alpha X}, \quad мг/м^3; \qquad (2.9)$$

где μ_0, запыленность на границе отвала, мг/м^3;

μ_X - запыленность на расстоянии X от дамбы, мг/м^3;

α - коэффициент затухания, 1/м; средний коэффициент затухания по данным разных съемок составляет $\alpha_{ср} = 6.2 \cdot 10^{-4}$

Угол бокового раскрытия факела пыли после схода с дамбы по мере его распространения составляет 10°.

2.17.При определении максимального текущего выноса золовых частиц с золоотвала и максимальных приземных концентраций расчет выполняется по максимальной скорости ветра на уровне флюгера с повторяемостью не менее 5%.

Динамическая скорость ветровоздушного потока при различной скорости ветра на уровне флюгера(Z=10м)

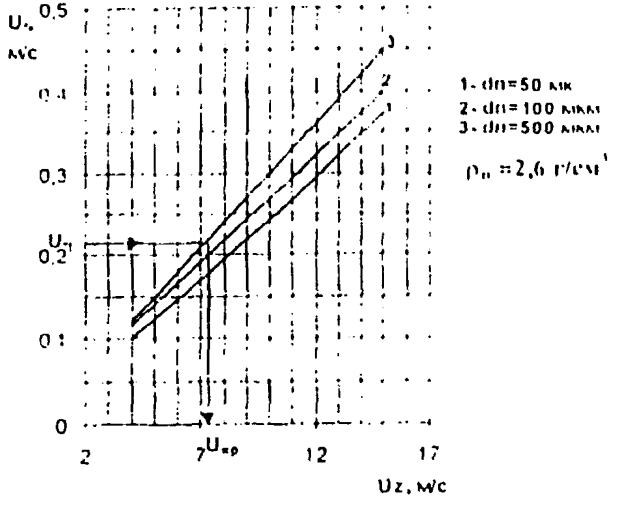


Рис. 1

Значение пороговой скорости U*t при A=0,1

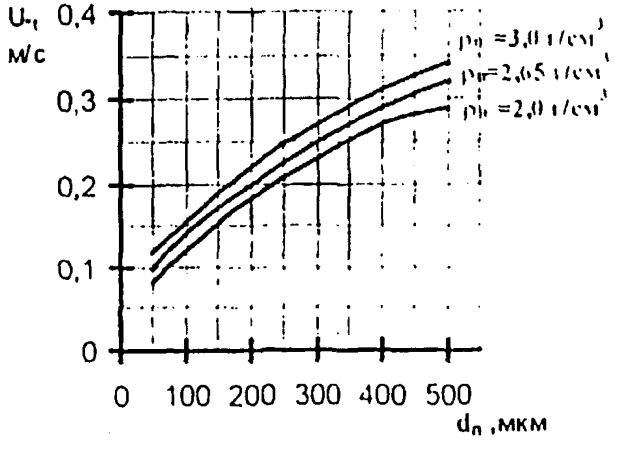


Рис.2.

Значение граничного размера частиц $d_{гр}$ при различной агрегатной плотности золы

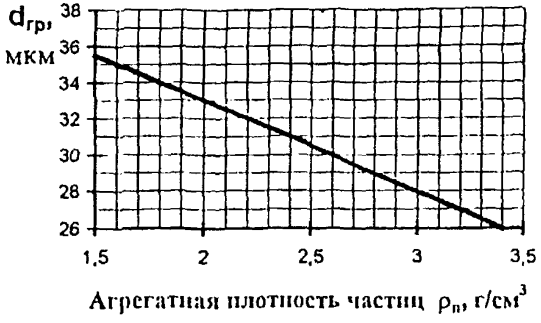
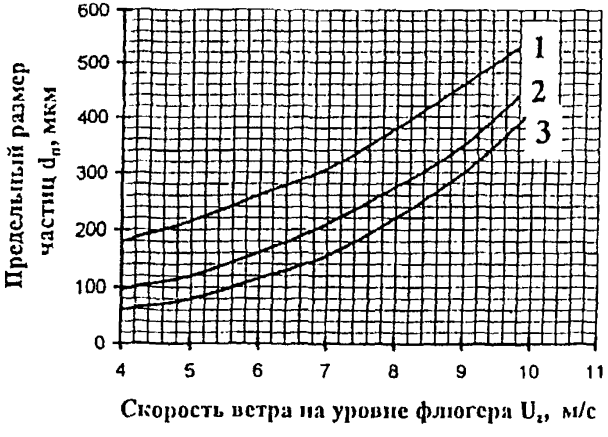


Рис. 3

Значение предельного размера эродируемых золовых частиц при различной скорости ветра на уровне флюгера



1- $\rho_П$ = 3,0 г/см^3, 2- $\rho_П$ = 2,65 г/см^3, 3 - $\rho_П$ = 2,0 г/см^3

Рис.4

3.ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛООТВАЛА КАК ПЛОЩАДНОГО ПЫЛЯЩЕГО ОБЪЕКТА

3..1. Для золошлакоотвала не характерна сплошная пылящая поверхность. Можно выделить три возможные зоны пыления:

- сухие пляжи на золошлаковых полях;
- дамбы, сложенные из золошлаков (неприсыпанных);
- отложения пыли в аэродинамической тени дамбы (вторичное пыление).

Характер поверхности золошлакового поля в значительной мере определяется способом намыва. Сброс золошлаковой пульпы из распределительного пульпопровода по периметру отвала обеспечивает фракционирование материала - осаждение наиболее крупных фракций у внутреннего откоса дамбы. Отстойный пруд намывного золоотвала обеспечивает осаждение наиболее мелких частиц золы. Неоднородность фракционного состава поверхностного слоя золошлакового поля формируется также, и вследствие неравномерного распределения золошлакового материала по фронту намыва - наиболее крупные фракции осаждаются у первых по ходу пульпы выпусков. Существуют способы направленного формирования неоднородности фракционного состава осаждаемого материала - в частности, т.н. раздельный способ намыва, при котором наиболее крупные и тяжелые фракции (в основном, шламовые частицы) отводятся из нижней точки распределительного пульпопровода и сбрасываются в периферийной части золоотвала, оставшаяся часть пульпы отводится к центральной части отвала.

В зоне надводных отложений золошлакоотвала увлажнение намытого материала осуществляется за счет капиллярного подъема воды, периодического изменения уровня пруда-осветлителя, осадками, применением специальных дождевальных систем поверхностного увлажнения. Нарушение поступления влаги к поверхности золошлакового поля приводит к образованию сухих пляжей.

Сухой пляж золоотвала представляет собой сложное сочетание участков интенсивного, среднего и малого пыления. Интенсивное пыление отмечается на участках, покрытых толстым слоем золы песчаной (несвязанной) фракции. Степень однородности намываемых золошлаков по дисперсному составу играет большую роль в дифференциации золошлакового материала при намыве и формировании пылящих сухих пляжей. Золошлаки высокой степени однородности (характерной для экибастузских углей) мало дифференцируются при намыве в золоотвал, что создает опасность пыления по большей части поверхности золошлакового поля. При высоком содержании шлаковых фракций (угли подмосковного бассейна, сжигание углей в топках с жидким шлакоудалением) на пляжах намыва откладываются крупные фракции (более 0,5 мм в диаметре), устойчивые к ветровой эрозии, тонкодисперсная зола складируется в зоне отстойного пруда и капиллярного смачивания.

3.2. Эродируемость поверхности слоя пылевых частиц определяется условиями формирования слоя и эродирующими свойствами частиц, рас-

мотренными выше. При этом выделяются следующие параметры поверхности, подвергаемой ветровому воздействию:

1) гранулометрический состав складируемого материала.;
2) влажность поверхностного слоя пылевых частиц - технологическая (за счет увлажнения путем орошения, остаточная влажность при колебании уровня воды в золоотвалах, увлажнение поверхностного слоя капиллярной влагой из подслойного водяного объема) и вследствие атмосферных осадков;
3) плотность поверхностного слоя, определяемая способом намыва золы (подводный или надводный, рассредоточенный или сосредоточенный), использованием механических средств уплотнения поверхностного слоя;
4) снеговой покров;
5) растительный покров на отработанных золоотвалах.

3.3. Эродируемость объекта определяется следующими факторами (помимо рассмотренных выше свойств материала и состояния поверхностного слоя):

1) защищенностью объекта от ветрового воздействия рельефом прилегающей местности;
2) конструкцией объекта - наличие и высота ограждающих систем (дамбы, защитные стенки, лесопосадки по периметру золо-отвала);
3) эксплуатационными характеристиками - уровень поверхности слоя относительно дамбы, окружающей территории, площадь сухих пляжей в гидрозолоотвалах;

Пруд-осветлитель является накопителем наиболее мелких фракций золы. Поэтому при отступлении уровня воды от расчетного осушенные отложения могут быть источником интенсивного пыления. Пруд практически полностью поглощает гравитирующие эродированные и ,частично, витающие частицы, поступающие с ветровым потоком на акваторию.

При обтекании ветровоздушным потоком дамбы происходит частичное обеспыливание его - выпадение значительной части эродированных золошлаковых частиц, преимущественно сальтирующих.

Рельеф примыкающей местности и высотное профилирование золошлакоотвала существенно влияют на характер и интенсивность ветровых потоков вдоль поверхности золошлакового поля. В ходе эксплуатации золоотвала по мере заполнения его и наращивания ограждающих сооружений высотная характеристика объекта по отношению к примыкающей местности может существенно трансформироваться.

4. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ЗОЛОШЛАКОВ ТЭС

4.1. При оценке пылевых выбросов золоотвалов ТЭС принимаются следующие исходные положения:

1) все эродируемые витающие частицы выносятся ветровоздушным потоком за пределы золошлакоотвала; осаждение их на поверхности пруда-осветлителя и дамбы не учитывается;
2) сальтирующие частицы полностью экранируются отстойным прудом, при оценке пылящих свойств объектов средний размер частицы d_n принимается по наиболее характерному (средневзвешенному) размеру эродируемых частиц в диапазоне от d_{max} до 0. При оценке загрязнения воздушного бассейна пылящим золошлакоотвалом расчет проводится как для линейного источника, располагающегося на границе отвала с подветренной стороны, при этом высотный размер данного источника соответствует высоте пылящего облака;
3) в расчете принимается однородность гранулометрического состава материала на пылящей поверхности;
4) пыление оценивается для нормальных, характерных для данного региона метеорологических условиях, не учитывается возможность аномальных атмосферных явлений (смерч, ураганные ветры), которые могут привести к нерасчетному катастрофическому сдуванию складируемого мелкозернистого и пылевидного материала;
5) для существующих отвалов принимается по данным наблюдений и измерений:

- площадь и положение пылящих участков золошлакового поля,
- гранулометрический состав на пылящих участках,
- период пыления (скорость ветра, соответствующая началу пыления золоотвала, продолжительность периода, в течение которого возможно пыление);
- высота пылевого облака над поверхностью золоотвала и на гребне дамбы;

7) для проектируемых золошлакоотвалов принимается:

- площадь пруда-осветлителя в соответствии с проектными материалами (до 70-80 % площади золошлакоотвала);
- площадь пылящего участка (до 20% поверхности сухих пляжей);
- пылящие участки сосредоточены у дамбы с подветренной стороны;
- средняя влажность пылящих частиц $W_{п}$ = 2,5% ;
- средняя скорость ветровоздушного потока, осуществляющего перенос эродируемых частиц над поверхностью золошлакоотвала (на оси пылевого облака), принимается 0,8 $U_{ср}$,
- высота пылевого облака на гребне дамбы принимается равной

удвоенной высоте подъема эродированных частиц над золошлаковым полем- 2h.

При отсутствии отдельных характеристик ветровой эрозии для существующих золошлакоотвалов принимаются значения соответствующих характеристик для проектируемых объектов.

4.2. Учет конструктивных, планировочных и природно-климатических факторов обеспечивается введением ряда поправочных коэффициентов $K_1 - K_4$ к расчетной величине сдува. Эти коэффициенты отражают:

K_1 - обеспыливание пылевого потока за счет осаждения золовых частиц при обтекании дамбы. K_1 принимается в зависимости от превышения гребня дамбы относительно уровня поверхности золошлакового поля по рис.5;

K_2 - состояние поверхностного слоя (коркообразование, агрегатирование золовых частиц в слое в результате химического взаимодействия) в зависимости от содержа ния окиси кальция в золе:

$K_2 = 1{,}0$ при $CaO < 10$ %;

$K_2 = 1 - 1{,}6129 \cdot 10^{-3} \cdot (CaO)^2$ при $CaO = 10\text{-}25$ %;

$K_2 = 0$ при $CaO > 25$ %.

K_3 - защищенность объекта от ветрового воздействия (влияние высотных элементов рельефа, специальных ветрозащитных сооружений, лесопосадок) и закрепления поверхности зольного пляжа - по табл. 1. При воздействии нескольких факторов защищенности коэффициент K_3 определяется перемножением соответствующих коэффициентов.

K_4 - применение оперативных методов пылеподавления (орошение пылящей поверхности водой и др.) определяется по табл. 2.

4.3. Гранулометрический состав поверхности пылящих участков отвала устанавливается экспериментальным путем для данного конкретного складируемого материала при характерной влажности, либо по справочным данным для пойменной золошлаковой зоны отвала [«Состав и свойства золы и шлака ТЭС», Справочное пособие под редакцией В.А.Мелентьева, Л.,1985].

4.4.При оценке ветровой эрозии (т/год) и среднегодового текущего выноса частиц (г/с) с поверхности золоотвала отдельные характеристики эродируемого материала и ветрового режима определяются следующим образом:

1) средняя скорость ветра на уровне флюгера U_{CP} в зоне размещения золоотвала принимается как средневзвешенное значение в диапазоне от скорости ветра, соответствующей началу сдува золовых частиц U_{KP}, до максимальной скорости ветра U_{MAX} с учетом повторяемости градаций скоростей;

2) средний размер эродируемых частиц $d_{ср}$ определяется как средневзвешенная величина в диапазоне от d_{MAX} до 0

$$d_{ср} = \Sigma(d \cdot a)_i / \Sigma d_i, \qquad (4.1)$$

где d - средний размер частиц i-той фракции,

a - доля частиц i-той фракции;

i - число фракций эродируемых частиц

3) предельный (максимальный) размер эродируемых частиц d_{MAX} определяется по средней скорости ветра в пылеопасный период $U'_{ср}$, значение которой первоначально задается равным 5-7 м/с, после чего определяются последовательно величины:

d_{MAX}, $d_{ср}$, U_{*t}, $U_{кр}$, $U_{ср}$

При расхождении значений $U'_{ср}$ и $U_{ср}$ более чем на 0,2 м/с расчет повторяют, скорректировав значение $U'_{ср}$.

4.5. Продолжительность периода возможной ветровой эрозии поверхности золоотвала $\tau_п$ определяется исходя из двух основных временных характеристик:

- относительной продолжительности пылеопасного ветрового режима $\tau'_{пыр}$, в течение которого скорость ветра на флюгере U_f остается больше скорости начала пыления $U_{кр}$ (определяемой по средневзвешенному размеру эродируемых частиц).
- относительной продолжительности периода возможного пыления $\tau'_{пов}$ по состоянию поверхности золоотвала, исключающего из рассматриваемого периода τ продолжительность периодов укрытия золовых пляжей устойчивым снеговым покровом, увлажнения осадками и талыми водами:

$$\tau'_{пов} = 1 - (\tau'_{сн} + \tau'_{сс} + \tau'_{т} + \tau'_{шт}) \qquad (4.2)$$

где $\tau'_{сн}$ - относительная продолжительность устойчивого снегового покрова;

$\tau'_{сс}$ - относительная продолжительность осадков в виде дождя и мокрого снега,

$\tau'_{т}$ - относительная продолжительность увлажнения поверхности золоотвала талыми водами,

$\tau'_{шт}$ - относительная продолжительность штиля;

В целом продолжительность периода возможной ветровой эрозии поверхности золоотвала определяется наложением двух рассмотренных временных характеристик:

$\tau_{пыл} = \tau \cdot \tau'_{пов} \cdot \tau'_{пыр}$ или

$$\tau_{пыл} = \tau \cdot [1 - (\tau'_{сн} + \tau'_{сс} + \tau'_{т} + \tau'_{шт})] \cdot \tau'_{пыр}, \text{ ч} \qquad (4.3)$$

где τ - продолжительность рассматриваемого периода, ч.

4.6 Текущий вынос золовых частиц с поверхности золоотвала (г/с)

При скорости ветра выше критической $U_{кр}$ (ниже которой $m_{вып} = 0$)

$$M_{вып} = M_{вып.взв} + M_{вып.сальт}, \text{ г/с} \qquad (4.4),$$

где $M_{вып.взв}$ и $M_{вып.сальт}$ - масса выносимых за границы золоотвала

лакоотвала витающих и сальтирующих частиц, г/с.

$$M_{вын} = m_0 \cdot (n_{вит.} \cdot S + n_{сальт} \cdot S_{эф} \cdot K_1) \cdot K_{2\text{-}4} \qquad (4.5),$$

где : m_0 -удельная сдуваемость материала пылящей поверхности при данном значении скорости потока на высоте флюгера, г/м^{2}с, определяемая экспериментально путем продувки проб золы с пылящих участков золоотвала в аэродинамической трубе с моделированием условий намыва золы и с приведением к скорости потока на высоте флюгера в соответствии с прил.1, либо по формуле 2.5. В качестве примера на рис.6 приведена удельная сдуваемость золовых отложений на отвалах Рефтинской и Южноуральской ГРЭС.

$n_{вит.}$, $n_{сальт}$ - доля витающих и сальтирующих частиц в сдуваемой золе;

$S_{эф}$ - эффективная площадь пылящей поверхности (м^2), на которой завершается нарастание в потоке массы сальтирующих частиц:

$$S_{эф} = S - S_{эк} \qquad (4.6),$$

где: S - полная площадь пылящей поверхности золоотвала, м^2;

$S_{эк}$- часть пылящего участка золоотвала, экранируемая отстойным прудом(находящаяся с наветренной стороны относительно пруда), м^2 ;

4.6.Годовой вынос золовых частиц или эродируемость объекта (т/год)

$$M_{эр} = \Sigma M_{эрi}, \qquad (4.7)$$

где $M_{эрi}$ - годовой вынос золовых частиц по каждому направлению ветра:

$$M_{эрi} = m_0^{ср} \cdot (n_{вит} \cdot S + n_{сальт} \cdot S_{эфi} \cdot K_1) \cdot K_{2\text{-}4} \cdot \tau_{пыл} \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ т/год} \qquad (4.8),$$

где $m_0^{ср}$ -удельная сдуваемость в г/м^{2}с, соответствующая средней скорости ветра $U_{ср}$

Зависимость коэффициента переноса золовых частиц при обтекании дамбы K_1 от скорости ветра U_z при различных превышениях гребня дамбы над зольным пляжем h

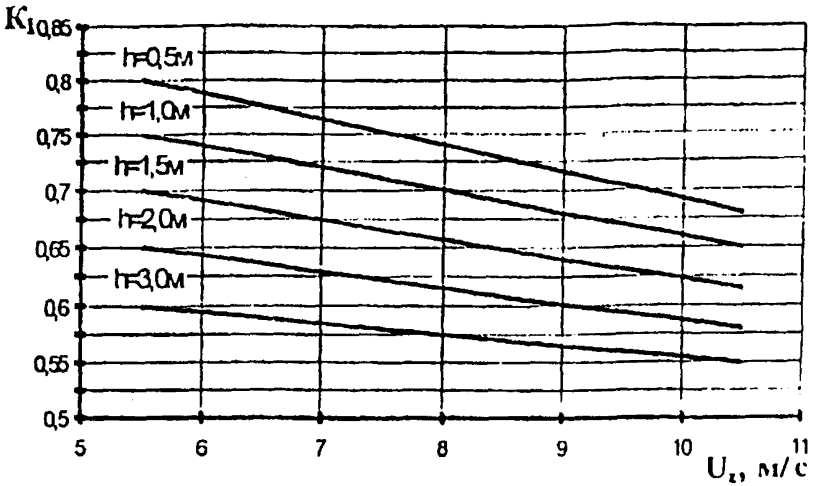


Рис. 5

Значение поправочного коэффициента K_3

Таблица 1.

Факторы защищенности отвала от пыления	K_3
1.Закрытие отвала высотными элементами рельефа: - с одной стороны - с двух сторон - с трех сторон	 0,6 0,3 0,15
2.Сооружение сплошных барьеров по периметру дамб отвала (решетчатые ограды, прокладка пульпопроводов по гребню дамбы, лесополосы вдоль границ отвала)	0,7
3. Относительное увеличение высоты дамбы, расположенной с подветренной стороны по отношению к преобладающим ветрам	0,85
4. Закрепление поверхности зольного пляжа вяжущими веществами (коркообразование)	0,1
5. Закрепление поверхности зольного пляжа шлаком	0,05
6. Закрепление поверхности зольного пляжа защитным слоем из связного грунта (суглинок, глина)	0,02

Значение поправочного коэффициента K_4

Таблица 2.

Метод оперативного пыленодавления	K_4
1. Поднятие уровня воды в пруде –осветлителе выше уровня *золового пляжа*	0 - 0,2
2. Периодическое орошение сухих пляжей стационарными дождевальными установками или поливочными машинами	0,1-0,5
3. Смачивание сухих пляжей осветленной водой, подаваемой по резервному пульпопроводу разводящей сети	0,2- 0,3
4. Учащение переключения пульповыпусков в теплое время	0,7

Зависимость удельной сдуваемости намытой золы от скорости ветра на высоте флюгера (10 м)

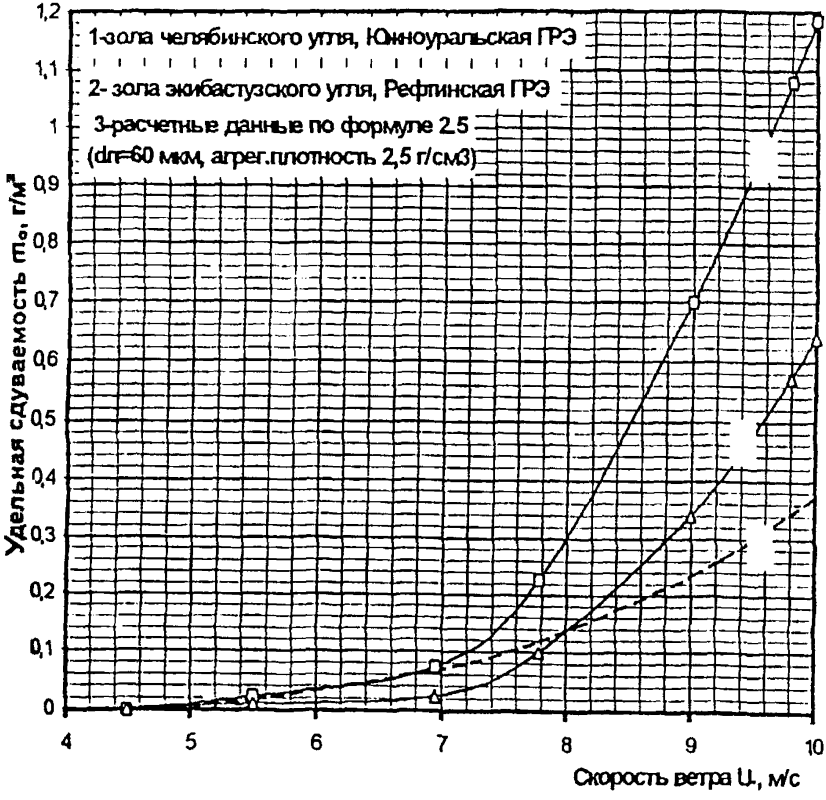


Рис.6

Приведение экспериментально определенной удельной сдуваемости к скорости ветра на высоте флюгера

Для оценки эродируемости частиц складируемого материала используется устанавливаемый экспериментальным путем интегральный параметр - удельная сдуваемость материала m_0, которая является базовой характеристикой для расчета ветровой эрозии поверхности золошлакоотвала и определяется продувкой проб материала в аэродинамической трубе.

Равенство средней скорости потока в аэродинамической трубе при определении удельной сдуваемости золошлаковых частиц и ветра на уровне флюгера над золоотвалом не означает идентичность условий сдува частиц в обоих случаях. В аэродинамической трубе (так же, как в натурных условиях) над обдуваемой поверхностью золошлакового материала формируется высотный градиент скорости. Экстраполяция лабораторных данных на натурные условия требует совпадения определяющего параметра ветрового воздействия - динамической скорости потока для условий золошлакоотвала и аэродинамических продувок. В закрытом канале, используемом для экспериментального определения удельной сдуваемости золошлаковых частиц, динамическая скорость потока определяется через величину сдвигового напряжения на стенке канала:

$$U_* = \left(\frac{\tau_w}{\rho_B}\right)^{0,5}$$

$$\tau_w = \rho_B u^2 0,045 Re^{-0,25}$$

где u - скорость на оси канала, м/с;

Re - число Рейнольдса

$$Re = \frac{uR}{\nu}$$

R - гидравлический радиус канала, м:

$$R = \frac{ab}{0,5(a+b)}$$

a и b - сторона прямоугольного канала, м;

ν - кинематическая вязкость воздуха, м^2/с.

Располагая расчетной зависимостью $U_* = f(U_z)$ для натурного золошлакоотвала (раздел 5, п.2.9) и экспериментальным графиком функции $m_0 = f(U_*)$, устанавливаем значение удельной сдуваемости для материала, складируемого на золошлакоотвале, при любом значении скорости ветра, замеряемой на любой высоте.

Приложение 2

АЛГОРИТМ И ПРИМЕР РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ЗОЛОШЛАКООТВАЛА

Наименование параметра	Расчетная формула, источник		Величина параметра в примере расчета
1	2		3
1.Основные исходные данные			
	Для действующих отвалов	Для проектируемых отвалов	Проектируемый золоотвал ТЭС
1.1. Содержание CaO в золошлаках	фондовые материалы ТЭС	справочные материалы	C_{CaO}<10%
1.2. Гранулометрический состав (в %)золошлаков на поверхности золошлаковой зоны сухого пляжа, агрегатная плотность $\rho_п$, кг/м^3	данные лабораторного анализа	-//-	>10мм-3,4; 10-5мм-4,4; 5-2мм- 1,65; 2-1мм-3,4; 1-0,5мм-4,35; 0,5-0,25мм-18,5; 0,25-0,125мм-25,8; 0,125-0,063мм-21,05; 0,063-0,04мм-8,9; <0,04мм-8,55. $\rho_п$ = 2400 кг/м^3
1.3.Характеристика ветрового режима:	данные метеонаблюдений		
1.3.1. Повторяемость в течении года скорости ветра различных градаций P_{U_i}, %	- // -		0-1м/с -38,05; 2-3м/с –33,2; 4-5 м/с-17,5; 6-7м/с -7,76; 8-9м/с-2,6; 10-11м/с -0,54; >11м/с - 0,35
1.3.2.Повторяемость различных направлений ветра в течение года (по восьмирумбовой розе ветров) P_k, %	- // -		С–20,8; СВ–12; В–7,2; ЮВ–5,8; Ю–12; ЮЗ–10,2; З–12; СЗ–20;
1.3.3. Относительная продолжительность штиля $\tau'_{шт}$,% год.фонда времени	- // -		23,0

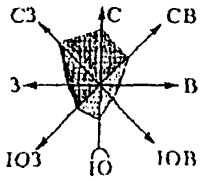
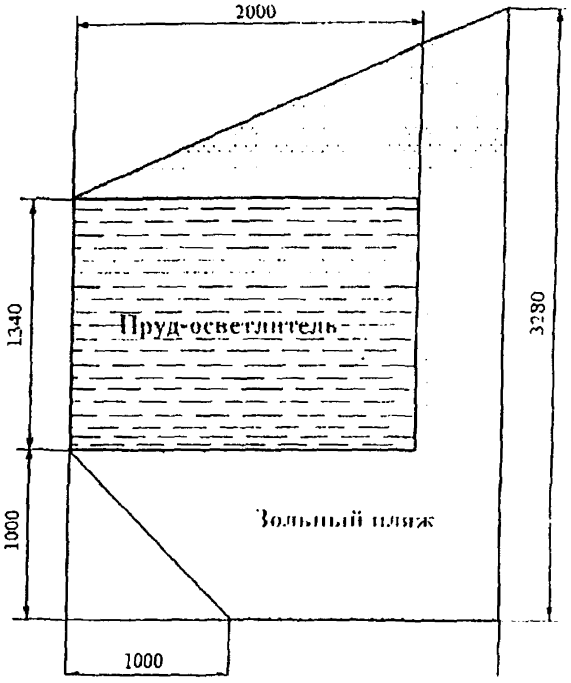
1	2		3
1.4.Относительная продолжительность периодов ограничения пыления по состоянию поверхности в % годового фонда времени , в том числе:	- // -		56,0
1.4.1.устойчивый снеговой покров τ_{CH}	- // -		42,5
1.4.2. увлажнение талыми водами τ_T	- // -		2,7
1.4.3. осадки τ_{OC}	- // -		10,8
1.5. Площадь золового поля S_{OTB}, м^2	Батиметрич. съемка	проект	6525000
1.6. Площадь пруда-осветлителя $S_{ПР.}$, м^2	- // -	$S_{ПР}=(0,6\text{-}0,9)\cdot S_{OTB}$	2680000
1.7. Площадь пылящих участков S, м^2	-//-	$S=0,2(S_{OTB}-S_{ПР.})$	769000
2. Характеристика эродируемых частиц			
2.1.Предельный размер эродируемых частиц d_{MAX} , мкм	график рис.4 или по формуле: $U'_{CP}/[2,5\cdot\ln(Z/d_{MAX})+8,5] = A\cdot(\sigma\cdot g\cdot d_{MAX})^{0,5}$ Предварительно принимается значение средней скорости ветра пылеопасного периода U'_{CP}		при U'_{CP} = 6,2 м/с d_{MAX}= 160
2.2.Средневзвешенный размер $d_П^{CP}$ (мкм) эродируемых частиц в пылящем слое (при $d_П<d_{MAX}$)	$d_П^{CP} = \Sigma(d_П\cdot a)/\Sigma a_i$ i- количество градаций размера частиц; a-весовая доля соответствующей градации		0,098
2.3.Граничный размер эродируемых частиц, разделяющий сальтирующие и витающие частицы $d_{ГР}$, мкм	график рис. 3		$d_{ГР}$=31,0
2.4. Пороговая динамическая скорость ветрового потока для средневзвешенного размера эродируемых частиц в слое U_{*t}, м/с	график рис.2 или по формуле: $U_{*t} = 0,1(\sigma\cdot g\cdot d_П^{CP})^{0,5}$ где: g-ускорение силы тяжести. м/с^2; $\sigma=\rho_П/\rho_в$; $\rho_П$ – плотность частиц, кг/м^3, $\rho_в$ - плотность воздуха, кг/м^3		U_{*t}, =0,135

1	2	3
	воздуха, кг/м^3	
2.5. Доля витающих и сальтирующих частиц в общей массе эродируемого золового материала ($d_{fr} < d_{MAX}$)	$n_{вит} = \Sigma a_{d_{max}-d_{fr}} / (1-a_{d_{max}})$; $n_{сал} = \Sigma a_{d_{fr}-0} / (1-a_{d_{max}})$	$n_{сал} = 0,87$ $n_{вит} = 0,13$
3. Характеристика ветрового режима		
3.1. Скорость ветра на уровне флюгера U_{KP}, соответствующая U_{*t} (началу пыления поверхностного слоя), м/с	График рис.1 или по формуле: $U_{KP} = U_{*t} \cdot [2,5 \cdot \ln(Z/d_{fr}^{CP}) + 8,5]$	$U_{KP} = 0,135 \cdot [2,5 \cdot \ln(10/0,098 \cdot 10^{-3}) + 8,5] = 5,04$
3.2 Среднегодовая скорость ветра на уровне флюгера в пылеопасном ветровом режиме ($U > U_{KP}$), U_{CP}, м/с	$U_{CP} = \Sigma(U \cdot P)/\Sigma P_i$, где i- количество градаций скорости в диапазоне от U_{KP} до U_{MAX}, U – средняя скорость ветра в пределах градации	$U_{CP} = 6,2 = U'_{CP}$, пересчет не требуется
3.3. Относительная продолжительность ветрового режима ($U > U_{KP}$), способствующего выдуванию золовых частиц, τ'_{Um}.	Данные метеонаблюдений	$\tau'_{Um} = 0,08$
3.4. Динамическая скорость потока U_*, соответствующая U_{CP}, м/с	График рис.1 или по формуле: $U_* = U_{CP} / [2,5 \cdot \ln(Z/d_{fr}^{CP}) + 8,5]$	$U_* = 6,2/[2,5 \cdot \ln(10/0,098 \cdot 10^{-3}) + 8,5] = 0,166$
4. Характеристика золоотвала		
4.1. Эффективная площадь пылящей поверхности $S_{ЭФ}$, м^2	$S_{ЭФ} = S - S_{ЭЖ}$.	$S_{ЭФ}^{C} = 619000$; $S_{ЭФ}^{CB} = 425000$; $S_{ЭФ}^{CЗ} = 653000$; $S_{ЭФ}^{Ю} = 469000$; $S_{ЭФ}^{ЮВ} = 260000$; $S_{ЭФ}^{ЮЗ} = 569000$; $S_{ЭФ}^{З} = 769000$; $S_{ЭФ}^{В} = 635000$
4.2 Продолжительность периода возможного пыления $\tau^{P}_{пыл}$ в течение рассматриваемого периода τ по каждому направлению ,ч	$\tau^{P}_{пыл} = \tau \cdot [1 - (\tau'_{CH} + \tau'_{Oc} + \tau'_{T} + \tau_{шт})] \cdot \tau'_{Um} \cdot P$	при τ=8760 часов: $\tau^{C}_{пыл} = 30,7$; $\tau^{CB}_{пыл} = 17,73$; $\tau^{CЗ}_{пыл} = 29,6$ $\tau^{Ю}_{пыл} = 17,73$; $\tau^{ЮВ}_{пыл} = 8,57$; $\tau^{ЮЗ}_{пыл} = 15,07$; $\tau^{З}_{пыл} = 17,73$; $\tau^{В}_{пыл} = 10,64$;
4.3.Поправочные коэффициенты к величине выноса золовых частиц K_1	График рис.5	По графику на рис.5 $K_1 = 0,775$ (превышение гребня дамбы над пляжем 1 м)

1	2	3
K_2	При CaO<10% K_2=1.0, при CaO=10-25% $K_2=1-10^3(0.127\,CaO)^2$, при CaO>25% K_2=0	K_2 = 1.0
K_3	Таблица 1	K_3=0,15 (отвал укрыт от ветра холмами с трех сторон)
K_4	Таблица 2	K_4=0,7(увлажнение пляжа переключением пульпопроводов)
5. Параметры ветровой эрозии		
5.1. Удельная сдуваемость золовых частиц m_O, соответствующая величине U_{CP}, г/м²с	Данные экспериментальной продувки (см прил. 1) Приближенная оценка по формуле: $m_O = 100 \cdot U_*^2 \cdot (U_*^2 - U_{*t}^2)$	$m_O = 100 \cdot 0,166^2 \cdot (0,166^2 - 0,135^2) = 0,0257$
5.2. Эродируемость золоотвала по каждому из направлений ветра, $M_{ЭРi}$ т/год	$M_{ЭРi} = m_o (n_{вит} \cdot S + n_{сал} \cdot S_{зд} \cdot K_1) \cdot K_{3-4} \cdot \tau_{max}/3600$	$M_{ЭР}^{С}$=154,29; $M_{ЭР}^{СВ}$= 66,58; $M_{ЭР}^{СЗ}$=155,35; $M_{ЭР}^{Ю}$= 71,69; $M_{ЭР}^{ЮВ}$= 22,92, $M_{ЭР}^{ЮЗ}$=70,8; $M_{ЭР}^{З}$= 106,52; $M_{ЭР}^{В}$= 54,59.
5.3. Эродируемость объекта $M_{эр}$ т/год	$\Sigma(M_{эр})_i$	$M_{ЭР}$ = 702,74
6. Расчет текущего пылевого выноса и рассеивания золовых частиц в атмосфере		
6.1. Направление ветра	по заданию	юго-восточный
6.2. Скорость ветра U_7, м/с	по заданию	6,2
6.3. Предельный размер эродируемых частиц d_{MAX}, мкм	график рис 4	при U_{CP} = 6,2 м/с d_{MAX}= 160
6.4. Средневзвешенный размер $d_п^{ср}$ (мкм) эродируемых частиц в пылящем слое (при $d_п<d_{MAX}$)	$d_п^{ср} = \Sigma(d_{пi} \cdot a_i)/\Sigma a_i$, i - количество градаций размера частиц a-весовая доля градации	$d_п^{ср}$ =0,098
6.5. Граничный размер эродируемых частиц, $d_{ГР}$, мкм	по графику рис 3	$d_{ГР}$=31,0

1	2	3
6.6. Доля витающих и сальтирующих частиц в общей массе эродируемого золового материала ($d_{П} < d_{MAX}$)	$n_{ВИТ} = \Sigma n_{dгр-0} / (1-n_{d\,dmax})$; $n_{САЛ} = \Sigma n_{dгр\,dmax} / (1-n_{d\,dmax})$	$n_{САЛ} = 0,87$ $n_{ВИТ} = 0,13$
6.7. Динамическая скорость потока U_*, соответствующая U_Z м/с	график рис.1 или по формуле: $U_* = U_Z / [2,5 \cdot \ln(Z/d_{П}^{СР}) + 8,5]$	$U_* = 6,2/[2,5 \cdot \ln(10/0,098 \cdot 10^{-3}) + 8,5] = 0,166$
6.8. Пороговая динамическая скорость ветра для средневзвешенного размера эродируемых частиц в слое U_{*t}, м/с	график рис.2 или по формуле $U_{*t} = 0,1(\sigma \cdot g \cdot d_{П}^{СР})^{0,5}$	$U_{*t} = 0,135$
6.9. Эффективная площадь пылящей поверхности $S_{ЭФ}$, м^2	$S_{ЭФ} = S_{ЭФ}^{ЮВ}$	$S_{ЭФ}^{ЮВ} = 260000$
6.10. Удельная сдуваемость золовых частиц m_0, соответствующая величине U_Z, г/м^{2}с	данные экспериментальной продувки (прил.1). Приближенная оценка по формуле: $m_0 = 100 \cdot U_*^2 \cdot (U_*^2 - U_{*t}^2)$	$m_0 = 100 \cdot 0,166^2 \cdot (0,166^2 - 0,135^2) = 0,0257$
6.11. Текущий вынос золовых частиц $M^{Т}_{вын}$, г/с	$M^{Т}_{вын} = m_0^{тек} \cdot (n_{вит} \cdot S + n_{сал} \cdot S_{ЭФ} \cdot K_1) \cdot K_{1-4}$	$M^{Т}_{вын} = 742,8$
6.12. Ширина пылевого облака $L_{П}$, м	для действ. отвалов - по наблюдениям, для проектируемых – длина дамбы, с которой сходит пылевое облако.	$L_{П} = 2460$
6.13. Эффективная скорость ветра, непосредственно воздействующего на эродированную частицу, $U_{ЭФ}$, м/с	$U_{ЭФ} = 0,8 \cdot U_{СР}$	$U_{ЭФ} = 0,8 \cdot 6,2 = 4,96$
6.14. Высота подъема эродированных частиц над золошлаковым полем h, м	$h = (U^2_{ЭФ}/g \cdot a) \cdot [(1+1/a) \cdot \ln(1+a) - 1]$, м $a = 0,0383 \cdot U_* \cdot U_{ЭФ}/\sigma \cdot d_{П}$	$h = (4,96^2/9,8 \cdot 0,173)[(1+1/0,173) \cdot \ln(1+0,173) - 1] = 1,196$ $a = 0,0383 \cdot 0,166 \cdot 4,96/1860 \cdot 0,098 \cdot 10^{-3} = 0,173$
6.15. Высота пылевого облака на дамбе h_0,	$h_0 = 2h$	$h_0 = 2 \cdot 1,196 = 2,392$

1	2	3
6.16.Начальная концентрация пылевых частиц на сходе с дамбы μ_o, мг/м^3	$\mu_o = M_{выр} / L_п \cdot h_o \cdot U_{эф}$	$\mu_0 = 742{,}8 \cdot 10^3 / (2460 \cdot 2.392 \cdot 4{,}96) = 25{,}45$
6.17.Приземная концентрация пылевых частиц μ_x (мг/м^3) на удалении x (м) от дамбы	$\mu_x = \mu_o \cdot e^{-ax}$, где a- коэффициент рассеивания, равный $6.2 \cdot 10^{-3}$	при x=200 м μ=7,36; при x=500 м μ =1,15. при x=830 м μ=0.148; при x=1000 м μ=0.0516

Расчетная схема золоотвала

Роза ветров пылеопасного периода (апрель-октябрь)