

между рядками, увеличения норм внесения минеральных удобрений до 50%.

Управление орошением в условиях, когда имеется оросительная вода различного качества, осуществляется преимущественно по двум схемам.

В первом случае оросительная вода применяется в смешанном виде при соблюдении требований качества. Вода низкого качества поступает непосредственно в оросительную сеть. В этом случае улучшается равномерность водоподачи и имеется возможность подавать большие расходы.

Во втором варианте имеется возможность использования для орошения двух типов вод различного качества. Водопользователь имеет возможность получать воду «по запросу». На ранних стадиях развития растений требуется полив водой хорошего качества. Орошение некачественными водами используется на последующих стадиях роста культур, когда они выдерживают повышенное засоление.

Анализ большого числа экспериментов по использованию вод различного качества (пресной воды из канала и минерализованной воды) методом смешивания и циклического использования (при одинаковой средневзвешенной солености) показали, что при использовании циклических режимов урожайность с/х культур выше, чем при использовании вод методом смешивания. При этом на ранних стадиях используется вода из оросительных каналов, а использование соленых вод осуществляется на поздних стадиях.

Список использованных источников

1. Yadav P.K., Sharma D.K., Yaduvanshi N.P.S. Agronomic and Nutrient Management Practices for Raising Crops Using Sodic Water //Gubrahan Singh, Ali Qadar, N.P.S. Yaduvanshi and P. Dey. (2009) Enhancing Nutrient Use Efficiency in Problem soils. Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, India, p. 208-231
2. Gupta, R. K., N. T. Singh, and M. Sethi (1994). Groundwater Quality for Irrigation in India (1:6 million scale). Tech. Bull. No. 19, CSSRI, Karnal - 132001, India, pp.16.
3. Minhas, P.S., D.R. Sharma, and C.P.S. Chauhan (2004). Management of Saline and Alkali Waters for Irrigation. In Advances of Sodic Land Recommendation. p121-162. International Conference on Sustainable Management of Sodic Lands, Lucknow. Feb, 9-14, 2004.
4. Minhas P. S. and J.S. Samra (2004). Quality Assessment of Water Resources in Indo-Gangetic Basin Part in India. Tech. bull. No. 1/2003, Central Soil Salinity Research Institute, Karnal-132001 (India), pp. 68.
5. Gupta, S. K. 2010. Management of Alkali Water. Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, India. Technical Bulletin : CSRI/Karnal/2010/01, p62.
6. Gupta I.C., 1998. Extent, distribution and utilization potencial of saline waters in Pajastan. Proceeding of National Conference, «Salinity Management in Agriculture», Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, December 2-5, 1998, (Editors S.K. Gupta, S.K. Sharma, N.K. Tyagi) - p. 233-252
7. Raman S. and Shrivastava P.K., 1998. Water management practices to minimize on-farm loses in heavy soils. Proceeding of National Conference, «Salinity Management in Agriculture», Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, December 2-5, 1998, (Editors S.K. Gupta, S.K. Sharma, N.K. Tyagi), p. 341-348
8. Mandal A.K., Obi Reddy G.P., Ravisankar. Digital database of salt affected soils in India using Geographic Information System. Journal of soil and Water Quality 3 (1), p. 16-29, 2011
9. Всемирный зерновой форум 2013. Индия – <http://www/grain-forum.com/rus/content/country/index.php>

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ: НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 532.51

МАСШТАБИРОВАНИЕ НАТУРНЫХ ОТКРЫТЫХ ПОТОКОВ

В.С. Вербицкий

ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Москва, Россия

Введение

В настоящей работе кратко представлено описание внутреннего механизма течения натуральных открытых потоков с развитой турбулентностью. По мнению автора, это описание интересно в физическом плане для гидротехников и мелиораторов, имеющих дело с равнинными реками. Кроме того, это описание интересно и в практическом плане.

В инженерных методах расчета мелиоративных, гидроэнергетических и водопроводных отстойников полагается, что средняя длина осаждения частиц взвешенных наносов с гидравлической крупностью W в равномерном потоке с глубиной H и средней скоростью U равна $L_W = \frac{H U}{W}$. Эта же формула лежит в основе различных методик расчета динамики мутности взвешенных наносов, которые были разработаны в институте в середине прошлого века д.т.н. А.Г. Хачатряном и д.т.н. Х.Ш.Шапиро.

Формально при $W \rightarrow 0$, $L_W \rightarrow \infty$. Поэтому в гидротехнике достаточно давно стоит задача развития указанных методов расчета для очень мелких частиц взвешенных наносов с очень малой гидравлической крупностью ($\sim 0,1$ см/с), для которых, в частности, по приведенной формуле для L_W получаются неправдоподобно большие длины отстойников.

В работе автора [1] предложено решение поставленной задачи. Оно опирается на релаксационную форму гидравлического описания течения жидкости и показывает, что для очень мелких частиц взвешенных наносов основное изменение их мутности в потоке происходит на длине релаксации средней скорости $L_0 = l_U = \frac{H}{\lambda_U}$. Из равенства величин $L_W = L_0$ следует, что при $W > \lambda_U U$ работает формула для L_W , а при $W \leq \lambda_U U$ работает формула для L_0 . Граничное отношение $\frac{W}{U} = \lambda_U \sim 10^{-2}$ очень мало. На основании аналогии Рейнольдса, рассмотренной в работе [1], можно считать, что частицы наносов с такими малыми и еще меньшими значениями $\frac{W}{U}$ движутся как жидкие частицы с $W = \frac{W}{U} = 0$. Поэтому для обоснования и объяснения указанной гидравлической методики в настоящей работе дополнительно рассматривается детальное «масштабное» описание турбулентности открытых потоков.

1 Гидравлическое масштабирование

Натурные турбулентные открытые потоки это большие и сложные физические системы. По известной синергетической парадигме для анализа внутреннего строения таких систем целесообразно провести их масштабирование: на основе различных опытных данных и теоретических соображений определить характерные пространственные, временные и скоростные масштабы отдельных частей. Определение этих масштабов позволит легко выделить различные части больших систем. Почти четверть века назад в трудах института была опубликована большая теоретическая статья автора [1], в которой, в частности, были приведены результаты по масштабированию русловых потоков. За прошедшее время у автора естественно появились различные уточнения и расширения результатов статьи, что и будет кратко представлено в дальнейшем изложении.

Из всего многообразия натуральных открытых потоков для анализа выбрано два широких спокойных равномерных потока с развитой турбулентностью, с большими и очень большими числами Рейнольдса. В таких потоках существует инерционный интервал спектра скоростей. Первый, рассмотренный в статье [1], - это типичный речной поток, который можно условно назвать модельным. Такое название определяется выбором удобных для «ручных» оценок характеристик потока. Позже выяснилось, что модельный поток очень близок к характеристикам р. Рона, ниже г. Лиона. $H = 100$ см, $U = 100$ см/с, $C_U = 10$, $\lambda_U = 10^{-2}$, $u_* = 10$ см/с, $i = 10^{-3}$, $Re = 10^5$, $Re_* = 10^5$, $Fr = 0,1$, $\varepsilon = 98,1$ см²/с³, $\nu = 0,01$ см²/с, C_U - безразмерный коэффициент Шези, $C_U = \frac{c}{\sqrt{g}}$, $\lambda_U = \frac{u_*^2}{U^2} = \frac{\lambda_R}{2} = \frac{\lambda_D}{8}$. Стандартный коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda_U = C_U^{-2}$, средняя по глубине диссипация $\varepsilon = g i U$.

Второй поток – это среднее течение в атмосфере Земли, для описания которого используется самая грубая модель однородной атмосферы с постоянными по высоте плотностью и температурой. Частично характеристики такого течения и модели заимствованы из известной монографии по турбулентности [5]. $H = 10$ км = 10^6 см, $U = 10$ м/с, $u_* = 50$ см/с, $\lambda_U = 0,0025$, $i = 2,55 \cdot 10^{-6}$, $Re = 6,67 \cdot 10^9$, $Re_* = 3,35 \cdot 10^8$, $Fr = 1,02 \cdot 10^{-9}$, $\varepsilon = 2,55$ см²/с³, $\nu = 0,15$ см²/с.

Имеются две причины выбора второго потока. Во-первых, это поток с гигантскими числами Рейнольдса, т.е. поток с предельно развитой турбулентностью. На примере этого потока достаточно рельефно выделяются основные характеристики турбулентности.

Именно для такого потока впервые была предложена теория турбулентности А.Н. Колмогорова, которая впоследствии была прекрасно подтверждена в различных экспериментах, не только для воздушных, но и водных потоков. Во-вторых, атмосферная турбулентность и связанная с ней погода – это повседневная реальность, весьма наглядная для понимания.

Для турбулентных открытых потоков существует два основных спосо-

ба теоретического описания - гидравлическое и турбулентное. Поэтому и масштабирование таких потоков (как гидравлическое, так и турбулентное) целесообразно провести двойко, а затем «свести» в одно целое.

В рамках одномерной гидравлической модели дифференциальное уравнение Сен-Венана для средней скорости при коэффициенте Буссинеска $\alpha = 1$ имеет вид для $U > 0$:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = g (J - i_f) = g \left(i - \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \lambda_{U1} \frac{v^2}{H} \quad (1)$$

где уклон трения $i_f = \lambda_U Fr$, i - уклон дна, J - уклон свободной поверхности

$J = i - \frac{\partial H}{\partial x}$. Стандартный вид члена с трением позволяет «сразу» ввести два характерных масштаба средней скорости - временной, $\tau_U = \frac{H}{\lambda_U v} = \frac{H C_U}{u_*}$, и продольный $l_U = U \tau_U = \frac{H}{\lambda_U} = H C_U^2$. Тогда $\lambda_U \frac{v^2}{H} = \frac{v}{\tau_U} = \frac{v^2}{l_U}$, что определяет масштабирование величин $\frac{\partial U}{\partial t}$ и $\frac{\partial U^2}{\partial x}$. Гидравлический смысл этих масштабов показан в работе автора [1], где уравнение (1) представлено в релаксационной форме:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = - \frac{v - U_p}{\tau_U} \quad (2)$$

Локально равновесное значение средней скорости $U_p = \frac{J}{i_f} U = g J \tau_U$.

Аналогично $U = g i_f \tau_U$.

Уравнение (2) описывает стремление, релаксацию мгновенного «неравновесного» значения средней скорости к ее равновесному значению U_p .

За время релаксации τ_U (и на длине l_U) при $t \gg \tau_U$ $U \rightarrow U_p$. Поэтому указанные масштабы названы релаксационными масштабами средней скорости.

Сам подход и терминология приняты по аналогии с термодинамикой, в которой широко применяется релаксационное приближение для описания временного изменения разного рода параметров неравновесных процессов.

Для равномерного потока $J = i_f = i$, $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$, $U = U_p$. Согласно термодинамической аналогии, указанной в [1], этот поток находится в равновесном состоянии.

Величина l_U в различных обозначениях неоднократно использовалась в гидравлике. Например, в принятых обозначениях известное давнее решение Н.М. Бернадского для продольной скорости стационарной струи, впадающей в водоем с постоянной глубиной, имеет вид $U(x) = U(0) \exp\left(-\frac{x}{l_U}\right)$ (3).

При этом, очевидно, $U_p = 0$ и $U(x) \rightarrow 0$ при $x \gg l_U$. Различные авторы для оценки длины входного участка трубы или лотка фактически использо-

вали величину $l \sim l_U$. На этой длине устанавливается «почти» равномерное течение с $U_p \approx \text{const}$.

В левой части уравнения (2) в общем случае фигурируют две производные скорости по времени - полная, лагранжева $\frac{dU}{dt}$, и локальная, эйлерова $\frac{\partial U}{\partial t}$. В правой части уравнения (2) имеется только одна временная величина τ_U , которая одинаково определяет и лагранжев, и эйлеров гидравлические временные масштабы средней скорости. Аналогичное замечание относится к величине l_U в отношении продольных масштабов.

По существующим представлениям уравнения (1,2) применимы как для всего сечения потока, так и для отдельных вертикалей. Релаксационная скорость $V_{\text{рел}} = \lambda_U U$ - это минимальная скорость гидравлического описания. Аналогично длина $l_{\text{min}} = \lambda_U H$ - это минимальная вертикальная длина такого описания. В гидравлике эти величины определяют теоретическую точность определения средней скорости и глубины в открытых потоках. При $U \sim 1$ м/с, $\lambda_U \sim 10^{-2}$, $V_{\text{рел}} \sim 1$ см/с, $l_{\text{min}} \sim 1$ см. Эти частные оценки совпадают с практическими рекомендациями по точности измерений средней скорости и уровня свободной поверхности.

В рамках одномерной гидравлической модели второе дифференциальное уравнение Сен-Венана для глубины имеет вид:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} = \frac{dH}{dt} + H \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Для стационарного течения с } \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{U - U_p}{l_U} \quad (5)$$

По аналогии с этим выражением уравнение для $\frac{\partial H}{\partial x}$ представлено также в релаксационной форме:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{H}{U} \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{H - H_p}{l_H} \quad (6)$$

Равновесное значение глубины $H_p = H \frac{l}{l_f}$, длина и время релаксации глубины $l_H = l_U \left(\frac{1}{Fr} - 1\right)$, $\tau_H = \frac{l_H}{U} = \tau_U \left(\frac{1}{Fr} - 1\right)$. Как и величины τ_U, l_U величины τ_H, l_H имеют одновременно и лагранжеву, и эйлерову трактовки. Величина l_H определяет характерные масштабы длин кривых спада или подпора. При $x \gg l_H$ $H \rightarrow H_p \rightarrow H_1$, где H_1 - нормальная глубина [1].

В равнинных речных потоках, в которых $Fr \ll 1$, $\tau_H = \tau_U Fr^{-1} \gg \tau_U$, т.е. релаксация глубины происходит значительно медленнее, чем релаксация скорости. Эта теоретическая оценка хорошо согласуется с натурными данными по равнинным рекам, согласно которым в фиксированном гидростворе максимум скорости наступает раньше, чем максимумы расхода, уровня и глубины.

В стилизации равномерного спокойного потока $\tau_H = \frac{H}{U}$, $l_H = \frac{H}{i} \gg l_U$. Если на равномерный открытый поток с постоянными параметрами H, i , $\lambda_U = \frac{gH^2}{U^3}$ и наложить малые возмущения глубины $h(x,t)$ и скорости $u(x,t)$, то их динамика описывается известным (в разных обозначениях) гиперболическим уравнением второго порядка, одинаковым для h и u , где $\tau_U = \frac{H^{2/3}}{g^{1/2} U^{1/2}}$, $U = \frac{H^{2/3} i^{1/2}}{n}$.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{3}{2} U \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{(gH - U^2)\tau_U}{2} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + U\tau_U \frac{\partial^2 h}{\partial t \partial x} + \frac{\tau_U}{2} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

В этом уравнении фигурирует коэффициент продольной диффузии глубины:

$$K_{hx} = \frac{U^2 (1 - Fr)\tau_U}{2} = \frac{U^2 \left(\frac{1}{Fr} - 1\right)\tau_U}{2}, \text{ где волновая скорость } U_B = \sqrt{gH}.$$

В спокойных потоках при $Fr \ll 1$

$$K_{hx} = \frac{U^2 \tau_U}{2} = \frac{HU}{2\lambda_U Fr} = \frac{HU}{2i} = \frac{l_H^2}{2\tau_H} \quad (8), \quad l_H = \frac{H}{i}, \tau_H = \frac{H}{U} = \frac{H^{1/3} n}{i^{3/2}}.$$

На основании известных трактовок выражения для любого коэффициента диффузии можно заключить, что согласно (8), возмущения движутся с волновой скоростью в одном направлении в течение временного промежутка τ_U , а возмущения,двигающиеся со средней скоростью, проходят продольный путь l_H за время τ_H .

На основании теории турбулентной диффузии с конечной скоростью, изложенной в работах [1,2], можно считать, что жидкие частицы движутся вверх-вниз (и вправо-влево) со скоростью порядка u_s . Поэтому, двигаясь вниз с уровня свободной поверхности, или вверх с уровня дна, они достигнут противоположной по вертикали границы потока в среднем за время

$$\Delta t = \tau_s = \frac{H}{u_s} \text{ и пройдут за это время продольное расстояние } \Delta x = l_s = U\tau_s = H C_v.$$

Величины τ_s, l_s названы элементарными или минимальными для гидравлического описания при $\lambda \neq 0$ по следующим причинам. Основное допущение, на которое опирается первое уравнение Сен-Венана, заключается в выражении среднего донного касательного напряжения через среднюю скорость по вертикали (или в сечении) с помощью величины λ_U , $\sigma(z_d) = \rho_0 u_s^2 = \rho_0 \lambda_U U^2$. Фактически это выражение есть определение величины $\lambda_U = \frac{u_s^2}{U^2}$.

Для того, чтобы с помощью процесса турбулентного перемешивания по вертикали касательное напряжение на дне получило информацию о скоростном поле по всей глубине (или по сечению) потока (которое характеризуется средней скоростью), и наоборот, необходимы определенные, указанные выше, минимальные промежутки времени и длины, на которых и происходит в среднем обмен информацией между скоростным полем и дон-

ным напряжением. При $C_U \gg 1$, $\lambda_U \ll 1$, $Fr \ll 1$, $i \ll 1$, $\tau_3 \ll \tau_U \ll \tau_H$, $l_3 \ll l_U \ll l_H$.

В боковом направлении жидкие частицы движутся также со скоростью порядка u_* , поэтому за время τ_3 они в среднем пройдут расстояние, равное глубине потока H . В целом элементарный параллелепипед гидравлического описания равен $H \times C_U \times H \times H$ (x, y, z) при объеме $W_3 = C_U H^3$.

Обычно считается, что уравнения гидравлики могут быть получены из уравнений Рейнольдса с помощью интегрирования по сечению или по глубине. Информационное использование λ -гипотезы показывает, что уравнения гидродинамики, в принципе, должны быть осреднены по пространственно-временному объему $W_3 \times \tau_3$. Это осреднение позволяет описать структуру турбулентности с указанными пространственным и временным масштабами с помощью коэффициентов Шези и гидравлического сопротивления.

В работе автора [1], на основании уравнения (8) и анализа расчетов Гризжена-Бренденхилла показано, что при малых числах Фруда (0,01; 0,16) на промежутках времени $\frac{\Delta t}{\tau_U} \geq 10$ применима модель диффузионных волн

$U(x, t) = C \sqrt{H |t|}$, при $\frac{\Delta t}{\tau_H} > 10$ - модель кинематических волн $U(x, t) = C \sqrt{H t}$.

Из уравнения (8) следует, что при $t_r = \frac{\tau_H}{\lambda_U} \gg 10 \tau_H$ применима модель добега расхода. Масштабы t_r , $l_r = t_r U$ названы гидрологическими, т.к. начиная с них нужно использовать гидрологическое описание течения природных открытых потоков, в котором гидравлические параметры C_U, λ_U не фигурируют.

2 Турбулентное масштабирование

Турбулентное масштабирование - это определение масштабов турбулентной структуры природных потоков. Для развитой турбулентности широко известна теоретическая модель инерционного спектра скорости, которая была параллельно предложена А.Н. Колмогоровым и А.М. Обуковым в самом начале сороковых годов прошлого века. Эта модель многократно подтверждена в различных экспериментах для воздушных и водных турбулентных потоков. При каскадном переносе энергии турбулентности, которое осуществляется путем дробления разномасштабных турбулентных образований (вихрей, молей) без потери энергии на молекулярное трение, характеристики турбулентных образований определяются только их размерами и постоянной величиной диссипации энергии. В инерционном интервале образования с размером l имеют пульсационную скорость $u'(l)$, которая по соображениям размерности связана соотношением $\varepsilon = \frac{(u')^3}{l}$, откуда $u'(l) = (\varepsilon l)^{1/3}$.

Гидравлическая стилизация турбулентности означает, что в этом соотношении в качестве величины ε берется ее среднее по глубине значение

$\varepsilon = giU = u_*^3 \left(\frac{H}{C_U}\right)^{-1}$. Тогда $u'(l) = u_* \left(\frac{lC_U}{H}\right)^{\frac{1}{3}}$. Вслед за Л. Прандтлем можно считать, что в пульсационном движении размер турбулентного образования равен длине его свободного пробега, тогда лагранжево время существования турбулентного образования $t^L(l) = \frac{l}{u'(l)} = \frac{H}{U} \left(\frac{lC_U}{H}\right)^{\frac{2}{3}}$ и длина его движения вдоль потока $L_c^L(l) = Ut^L = H \left(\frac{lC_U}{H}\right)^{\frac{2}{3}}$. Лагранжево ускорение $a^L(l) = \frac{u'}{t^L} = giC_U \left(\frac{lC_U}{H}\right)^{-\frac{1}{3}}$.

Если l - продольный размер турбулентного образования, то по гипотезе замороженной турбулентности эйлерово время продольного «прохода» этого образования через фиксированную точку пространства $t^E(l) = \frac{l}{U}$. По соображениям размерности коэффициент турбулентной диффузии:

$$K(l) = u'l = (u')^2 t^L = \frac{H u_*^3}{C_U} \left(\frac{lC_U}{H}\right)^{\frac{4}{3}}.$$

Для атмосферы этот закон в эмпирической форме $K(l) = a \frac{l^{\frac{4}{3}}}{H}$ был найден Л. Ричардсоном (1926) в огромном диапазоне изменения величины l . Спектр эйлеровой скорости $E^E(l) = (u')^2 l = \frac{H u_*^3}{C_U} \left(\frac{lC_U}{H}\right)^{\frac{5}{3}}$. При волновом числе $k = l^{-1}$ - это спектр А.Н. Колмогорова. Спектр лагранжевой скорости $E^L(t^L) = (u')^2 t^L = \frac{H u_*^3}{C_U} \left(\frac{t^L H}{H}\right)^2$. При частоте $\omega = (t^L)^{-1}$ - это спектр Иноу (1950). Если рассматривать этот спектр как функцию l , то $E^L\left(\frac{lC_U}{H}\right) = K\left(\frac{lC_U}{H}\right)$.

На основании полученных характеристик турбулентности, ее структуру можно разделить на микро-, мезо-, макро- и мегатурбулентность. Сама форма записи этих характеристик показывает, что одной из определяющих величин этой структуры является величина $l = \frac{H}{C_U}$. Тогда $u'(l) = u_*$,

$$t^L = \frac{H}{C_U u_*} = \frac{H}{U}, \quad a^L = giC_U, \quad K(l) = \frac{H u_*^3}{C_U} = \lambda_U UH.$$

Отнесем эти размерные величины к характеристикам мезотурбулентности. При $C_U \gg 1$, $l = \frac{H}{C_U} \ll H$. В известной феноменологической модели Л. Прандтля (1930) перенос турбулентного импульса по вертикали осуществляется вверх-вниз малыми жидкими молями, размер которых равен длине пути перемешивания и много меньше глубины потока. Следовательно, исходя из более поздней теории А.Н. Колмогорова, можно «в точности» попасть в модель Л. Прандтля и в определенной мере уточнить эту модель как мезотурбулентную. Величина u_* повсеместно используется для нормировки стандартов пульсационной скорости. Величина $\frac{H}{U}$ использовалась Б.А. Фидманом для нормировки временного аргумента лагранжевой корреляционной функции вертикальной скорости. Величина H повсеместно используется для нор-

мировки аргумента продольных эйлеровых корреляционных функций. По эмпирической формуле А.В. Караушева величина коэффициента турбулентной вязкости K_Z в принятых обозначениях изменяется в пределах:

$$K_Z = (0,77; 1,88) \lambda_U UH \text{ для крайних речных значений } C=(10; 90) \text{ м}^{1/2}/\text{с}.$$

Средние по глубине значения вертикального коэффициента турбулентной диффузии и вязкости при логарифмическом распределении скорости $\bar{K}_Z^l = \frac{\alpha H u_*}{6}$, где α – параметр Кармана, при степенном распределении

скорости с показателем m , $\bar{K}_Z^m = \frac{H u_*}{6 m C_U}$. Из равенства этих выражений следует

известное соотношение $\alpha m C_U = 1$. Для типичных значений $\alpha=0,4$, $m=1/6$,

$C_U=15$, удовлетворяющих этому соотношению, получим $\bar{K}_Z^l = \bar{K}_Z^m = K = \frac{H u_*}{C_U} =$

$\frac{H u_*}{15}$, т.е. получим «давнюю» формулу Базена-Буссинеска. На базе гидравлической стилизации мезотурбулентности в этой формуле объединились эмпирика Л. Ричардсона, физические идеи Л. Прандтля, теория А.Н. Колмогорова, А.М. Обухова, значение $\alpha=0,4$ (И. Никурадзе, Т. Карман), значение $m=1/6$ (Маннинг, А.Д. Альтшуль).

Для других значений α , m , C_U найденное теоретическое значение K служит характерным масштабом оценки опытных значений вышеуказанных коэффициентов, например, для формулы А.В. Караушева. Это важно потому, что в равнинных реках значения α , m , C_U изменяются на порядок: $\alpha = 0,2 \div 2,3$ (Г.В. Железняков, Г.А. Дружинин),

$$m = 0,05 \div 0,4 \text{ (В.С. Алтунин), } C_U = 3 \div 30 \text{ (А.В. Караушев).}$$

По известной в теории турбулентности оценке среднее время перемешивания турбулентной жидкости по вертикали в потоке с глубиной H в гидравлической стилизации равно $\tau_{\text{пер}} = \frac{H^2}{K_Z} = \frac{H}{\lambda_U U}$. Тогда продольная длина этого перемешивания $l_{\text{пер}} = \frac{H}{\lambda_U}$. Эти величины, полученные в гидравлической стилизации теории турбулентности, в точности совпадают с величинами τ_U, l_U , которые фигурируют в релаксационной форме гидравлической теории. Такое совпадение непосредственно объединяет эти теории на базе использования гидравлических сопротивлений. Образно говоря, масштабы τ_U, λ_U как «гвозди» сколачивают между собой две теории.

В лабораторных опытах Джобсона и Сэйра (1970), в рамках плоской задачи, исследовалось установившееся по длине и вертикали распределение мутности частиц различной крупности, выпущенных из точечного источника во входном створе равномерного потока. На основе разработанной автором теории турбулентной диффузии с конечной скоростью В.А. Кашиным были проведены численные расчеты по данным указанных опытов [2]. Для частиц-индикаторов с гидравлической крупностью $w = 0$, при коэффициенте отражения от дна, равном единице, результаты численных расчетов хорошо совпадали с опытными данными и по длине, и по вертикали (рис.1).

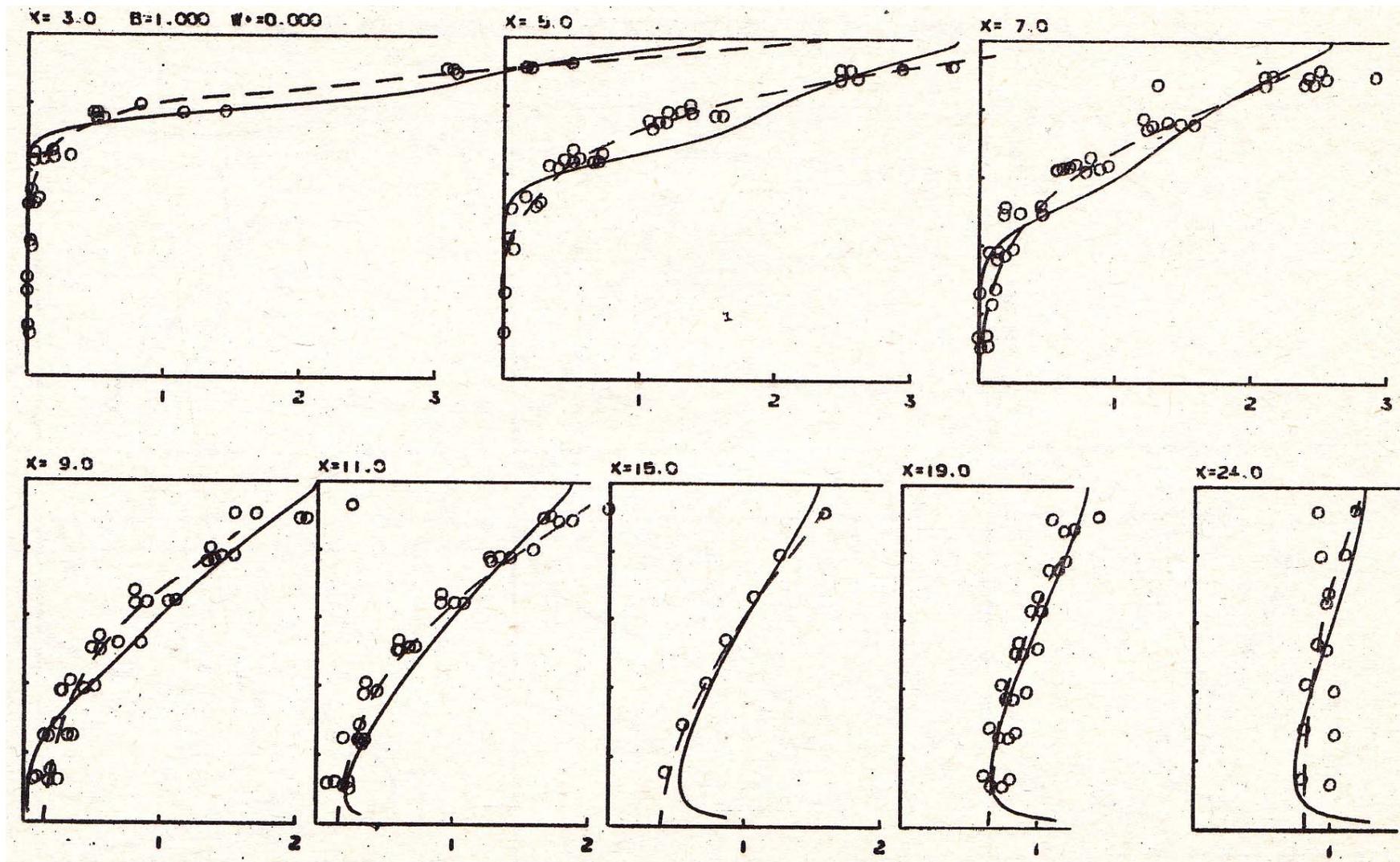


Рисунок 1 - Опытные и расчетные профили мутности частиц – индикаторов с $w=0$, выпущенных из точечного источника, $X=x/H$

Расчеты были повторены для различных положений начального источника по вертикали. Во всех случаях оказалось, что равномерное по глубине распределение мутности устанавливалось в створе H/λ_U . По аналогии Рейнольдса характеристики частиц-индикаторов совпадают с характеристиками жидких частиц, поэтому полученные результаты означают, что любая жидкая частица «забудет» свое начальное положение на вертикали в потоке через промежуток времени τ_U в створе l_U . С равной вероятностью эта частица может попасть в любую точку по вертикали в створе l_U . Следовательно, величину $\tau_{\text{нпр}} = \tau_U$ можно считать постоянной памяти турбулентного потока, которая определяется его «мезоперемешиванием» по вертикали. С различными обоснованиями в гидравлике неоднократно использовался комплекс, который в принятых обозначениях равен $\lambda_U \frac{H}{H}$. По опытным данным при $Fr \ll 1$, $\lambda_U \frac{H}{H} \cong 1$ плановая картина оказывалась автомодельной по этому комплексу. В физическом плане это означает, что берега на вертикальное перемешивание жидкости и в целом на план течения не влияют.

Приведем параллельно некоторые характеристики мезомасштабной турбулентности для речного потока и атмосферы $l=(10\text{см}, 500\text{м})$, $u'=(10; 50)\text{см/с}$, $t^L = (1\text{с}; 17\text{мин})$, $t^E = (0,1\text{с}; 50\text{с})$, $L_K^L = (1\text{м}, 10\text{км})$,

$$K = (100\text{см}^2/\text{с}, 250\text{м}^2/\text{с}).$$

Мезомасштабный моль в атмосфере - это приблизительно куб с высотой, почти равной высоте Останкинской телебашни, с такими же продольными и поперечными размерами. Через «створ» башни такой моль «проплывает» за 50с, за время существования (17 мин) моль проходит вдоль направления среднего ветра со скоростью 36 км/ч расстояние в 10 км, а затем перемешивается со средой. Расчетное значение величины K в атмосфере неплохо согласуется с опытными значениями $K = (100 \div 300)\text{м}^2/\text{с}$. Микромасштабная турбулентность характеризуется колмогоровскими масштабами, которые в гидравлической стилизации равны $l_K = \frac{v^{3/4}}{\varepsilon^{1/4}} \frac{H}{c_U} (K)^{-3/4} =$

$$(0,01; 0,19)\text{см}, \quad t_K = \left(\frac{v}{\varepsilon}\right)^{1/2} = \frac{H}{v} (K)^{-1/2} = (0,01; 0,25)\text{с}$$

$u_K = (v\varepsilon)^{1/4} = u_* (K)^{-1/4} = (1; 0,78)\text{см/с}$. Релаксационная скорость $V_{\text{рел}} = \lambda_U U = (1; 2,5)\text{см/с}$. Для обоих потоков гидравлическая релаксационная и турбулентная колмогоровская скорости близки. Для водного и воздушного потоков $v = (0,01; 0,15)\text{см}^2/\text{с}$. Безразмерный мезомасштабный коэффициент турбулентной диффузии $\tilde{R} = \frac{K}{v} = \frac{R\varepsilon_*}{c_U} = \lambda_U Re = (10^4; 1,67 \cdot 10^7)$.

В развитой турбулентности $\tilde{R} \gg 1$, поэтому в ней колмогоровские масштабы много меньше прандтлевских $l_K \ll l_{\text{пр}}$, $t_K \ll t_{\text{пр}}$, $u_K \ll u_{\text{пр}}$. Иногда величину $\lambda_U Re$ называют числом Лагранжа La . На основе проведенного рассмотрения

это число получает четкий физический смысл.

Опытные данные, например, спектр эйлеровых скоростей в атмосфере, показывают, что нижняя граница инерционного интервала равна $10 l_K$. Для турбулентных образований с масштабом $l < 10 l_K$ имеет место вязкий интервал спектра, который определяет переход энергии турбулентности в тепло. Это связано с тем, что по мере уменьшения размеров и скоростей турбулентных образований возрастает их ускорение.

Мезомасштабное ускорение $a = \frac{u_1 U}{H} = g C_V i = (0,1; 3,1 \cdot 10^{-4}) g$. Колмогоровское ускорение $a_K = g C_V I K^{1/4} = (10^{-1}, 10^{-2}) g \gg a$. Формально колмогоровские масштабы могут быть определены по закономерностям инерционного интервала при $K = \nu$ (соответствующего ламинарному течению с коэффициентом молекулярной вязкости ν). Реально колмогоровские масштабы являются для инерционного участка спектра асимптотическими - спектр «нацелен» на эти масштабы, но не достигает их, т.к. соответствующая скорость меньше колмогоровской.

Макротурбулентность состоит из макромолей, которые занимают всю глубину потока и имеют приблизительно такие же размеры вдоль и поперек потока. Характеристики макротурбулентности: $l = H = (1\text{м}, 10\text{км})$,

$$u = u_* C_V^{1/3} = (21,5 \text{ см/с}; 1,36 \text{ м/с}), \quad t^L = \frac{H}{U} C_V^{2/3} = (4,64\text{с}; 2,05\text{ч}),$$

$$t^E = \frac{H}{U} = (1,0; 10^3) \text{с}, \quad L_X^L = H C_V^{2/3} = H (\lambda_U)^{-1/3} = (4,63\text{м}, 73,7\text{км}),$$

$K = C_V^{1/3} H u_* = (\lambda_U)^{1/3} H U = (2150 \text{ см}^2/\text{с}, 1,36 \cdot 10^{10} \text{ м}^2/\text{с})$. Этот коэффициент дает масштаб для коэффициентов K_{xx} и K_{yy} продольной и поперечной диффузии дифференциальных уравнений плановой гидравлики.

Данные фото- и киносъемки движения частиц-индикаторов в лабораторных открытых потоках, которые были получены Б.А. Фидманом и А.Б. Клавеном (с подвижной камеры) показывают, что случайные по форме и протяженности области пульсационного движения частиц вверх и вниз могут охватывать всю глубину потока и иметь приблизительно такую же протяженность вдоль потока. Это есть фиксация случайных макромолей, которые сами вверх-вниз не движутся. Два последовательных по потоку макромоля, в которых чередуются пульсационные движения вверх и вниз, образуют макровихри. Опираясь на эти данные, К.В. Гришанин [3] теоретически установил, что продольный шаг цепочки больших вихрей, которые занимают всю глубину потока, равен

$l_{\text{БВ}} = \left(\frac{2}{\lambda_U}\right)^{1/3} H$. На основании этого

теоретического результата Б.Ф. Сنيщенко получил, что средняя длина больших песчаных гряд в реках $l_r = l_{\text{БВ}}$, а их высота равна $0,1H$. По кинематическому смыслу шаг цепочки больших вихрей должен быть равен продольной длине переноса макромолей. Поэтому, с точки зрения рассматриваемой методики, К.В. Гришанин использовал гидравлическую стилизацию

инерционного интервала для единственного линейного масштаба макро-структуры турбулентности. В пустынях длина песчаных дюн имеет порядок сотни метров, поэтому генезис этих дюн связан с мезомолями, а не с макро-молями. В атмосфере по порядку величины характеристики макромолей оценивают характеристики кучево-дождевых облаков. Вертикальные размеры этих облаков достигают 12 км, продольные и поперечные размеры 20 ÷ 30 км. Время существования порядка часа, полоса выпадения сильного дождя редко превышает 100 км. По аналогии можно предположить, что из речных макромолей происходит «сильное» выпадение переносимых частиц песка, которое и приводит к образованию больших песчаных гряд. «Забор» песка в макромоли происходит с верхних по течению гряд.

Совершенно аналогично тому, как определялись время и длина полного мезотурбулентного перемешивания по вертикали, определяются время и длина полного макротурбулентного перемешивания по горизонтали при $K_{yy} = C_U^{1/3} u_* H$, $\tau_{yx} = \frac{v^2}{K_{yy}} = \beta^2 C_U^{2/3} \frac{H}{U}$, $L_{yx} = \beta^2 C_U^{2/3} H = \beta C_U^{2/3} B$, $\beta = \frac{B}{H}$. Створ L_{yx} - это створ полного смешения, в котором выпущенная в начальном створе невесомая примесь (сточные воды, нефтяные загрязнения и т.п.) равномерно распределяется по всему сечению потока. Если расход примеси Q_s и она не откладывается на дне и берегах потока, то ее максимально возможная объемная мутность (M^3/M^3) в створе L_{yx} , $S = \frac{Q_s}{Q}$, где Q - расход равномерного потока.

Автор, опираясь на известный подход В.Н. Гончарова для описания трехмерной показательной эпюры средней продольной скорости, получил, что для широкого открытого потока имеет место (в среднем) равенство касательных напряжений на дне τ_d и берегах τ_b при $\beta_T = \frac{B}{H} = \frac{\tau_b}{\tau_d} = 2 C_U^{4/3} = \frac{2}{\lambda_U^{2/3}}$. Для размываемого ложа речных потоков эта формула дает определение гидроморфометрического равновесия – равнонапряженности поперечного сечения. При $\beta > 1$ преимущественно размываются берега, при $\beta < 1$ - дно. Полученная гидроморфометрическая формула продолжает известный подход, согласно которому $\beta \sim \lambda_R^3$, например, по И.Ф. Карасеву для широких потоков $\beta = \frac{1}{(\lambda_R)^{0,8}} = \frac{1}{(2\lambda_U)^{0,8}}$.

В 2006-2008 гг. ООО «ЭКОНГком» (гендиректор С.С. Медведев) проводило гидрометрические работы на р. Вятка, у д. Луговой Изран. При анализе полученных результатов по реальным величинам $\beta = \frac{B}{H}$, автор получил, что при различных расходах, от паводковых до меженных, относительная величина $\beta_1 = \beta/\beta_T$ изменяется в сравнительно небольших пределах $Q \text{ м}^3/\text{с}$ 3050; 1910; 1810; 1450; 336;

$$\beta_1 = \frac{\beta}{\beta_T} = 0,685; 1,073; 1,013; 1,97; 2,6.$$

При паводке больше размывается дно, т.к. один берег высокий, при межени – низкий берег, при средних расходах имеет место гидроморфометрическое равновесие, которое подтверждает теоретическую оценку. Макромоль, двигаясь в поперечном направлении со скоростью $C_V^{1/3} u_*$, в среднем проходит всю ширину потока за время $\frac{B}{C_V^{1/3} u_*}$. Время полного мезотурбулентного перемешивания по вертикали $\frac{H C_V}{u_*}$. Равенство этих времен означает, что в макромолье за время пути вся жидкость перемешалась по вертикали и что относительная ширина $\beta = C_V^{4/3}$. Близость этой турбулентной оценки и вышеприведенной гидравлической (и их равенство при $\frac{B}{z}$) позволяет дать «турбулентное» объяснение гидроморфометрическому равновесию. Если модельный речной поток находится в таком равновесии, то его ширина $B = 2 C_V^{4/3} H = 43,06$ м, длина и время полного смешения по ширине $L_{BX} = 4 C_V^{10/3} H = 2 C_V^2 B = 8,6$ км $\gg \frac{H}{l} = 1$ км $\gg H C_V^2 = 100$ м, $\tau_{BX} = \frac{L_{BX}}{U} = 2,3$ час $\gg \frac{H}{U} = 0,28$ час $\gg \frac{H C_V^2}{U} = 100$ с. Эти характеристики, с одной стороны, оказались самыми большими среди других турбулентных характеристик, с другой стороны – много меньшими аналогичных гидрологических $l_T = \frac{H}{\lambda_V l} = 100$ км, $\tau_T = 2,78$ час. Для равнинных рек, сечения которых находятся в гидроморфометрическом равновесии, при типичном значении $C_V \sim 10$, полное вертикальное мезоперемешивание происходит на длине порядка $100 H$, а полное горизонтальное макроперемешивание – на длине порядка $100 B$.

Характеристики мегатурбулентности, полученные на основе гидравлической стилизации инерционного интервала $l = H C_V^2 = \frac{H}{\lambda_V} = l_V = (100 \text{ м}, 4000 \text{ км})$, $u = C_V u_* = U = (1; 10) \text{ м/с}$, $t^L = \frac{H C_V^2}{U} = \frac{H}{U \lambda_V} = \tau_V = (100 \text{ с}, 4,63 \text{ сут})$, $t^E = \frac{l}{U} = t^L = (100 \text{ с}, 4,63 \text{ сут})$, $L_X^L = U t^L = \frac{H}{\lambda_V} = l_V = (100 \text{ м}, 4000 \text{ км})$, $K = C_V^3 H u_* = \frac{H U}{\lambda_V} = (10^2; 4 \cdot 10^7) \text{ м}^2/\text{с}$. Мегамолье занимают всю глубину потока, их отличительным свойством является равенство эйлера времени прохождения через створ и продольного размера лагранжевому времени существования моля и продольной длине его перемещения (до его распада), что согласуется с гидравлической трактовкой величин τ_V , λ_V . Это свойство продольного движения мегамолье совершенно аналогично свойству вертикального движения молей Л. Прандтля, откуда и появился термин «мегамоль». Кроме того, продольный размер мегамолье на порядок меньше длины земной окружности ($\cong 40000$ км), аналогично тому, как вертикальный размер молей Прандтля на порядок меньше глубины потока. В принципе, верхние мегамасштабы инерционного интервала, так же как и

нижние, колмогоровские, являются асимптотическими. Действительно, трудно представить спокойные потоки, в которых пульсация продольной скорости равна ее среднему значению, т.е. в какие-то промежутки времени, при $u = -U$, поток должен останавливаться. Таким образом, на линейных и временных масштабах мегатурбулентности величина пульсационной скорости реально должна быть меньше средней скорости. По опытным данным, в водных потоках и в атмосфере пульсационная скорость на масштабах τ_U, l_U равна $(0,1;0,3)U$. Формально, в теоретическом плане удобно считать, что пульсационная скорость может достичь максимальной величины U на масштабах τ_U, l_U , которые логично считать максимальными масштабами турбулентности. Следовательно, описание турбулентности открытых потоков занимает интервал от колмогоровских масштабов до указанных релаксационных.

В атмосфере инерционный интервал простирается до масштаба $l \cong 1000\text{км}$, меньшего l_U . По данным Д. И. Гринвальда и В.И. Никоры (р.Днестр), верхняя граница инерционного интервала равна $10B, \approx 100H, \approx l_U$. При $10B < l_U$ мегамолы могут не существовать, но длина l_U сохраняет свое значение как продольная длина вертикального мезоперемешивания.

Гидравлическое описание открытых потоков (по терминологии [1] гидравличность) занимает интервал от элементарных масштабов до гидрологических. На интервале $l_3 = HC_U$ и $l_U = HC_U^2$ гидравлическое описание пересекается с турбулентным. На граничных релаксационных масштабах τ_U, l_U в водных потоках одновременно существуют и мегатурбулентность, и гидравличность. На гидрологических масштабах одновременно существуют как гидравличность, так и гидрологичность. На масштабах, больших гидрологических имеет место только гидрологическое описание (гидрологичность по терминологии [1]).

На основании теоретических соображений В.В. Коваленко [4] нашел и подтвердил опытными данными по рекам, что в спокойных неравномерных потоках с $Fr \ll 1$, $\frac{\partial H}{\partial x} < 0$ существуют стохастические колебания расхода со средним периодом $T = \frac{\pi C^2 H}{g}$, т.е. в принятых обозначениях $T = 3\tau_U$. С этими колебаниями расхода связаны случайные колебания продольной скорости, которые могут относиться к речной мегатурбулентности и, в принципе, могут существовать в равномерных потоках. В монографии по турбулентности А.С. Мониной и А.М. Яглома [5] приведен спектр горизонтальной компоненты скорости ветра, который был получен Ван дер Ховеном на 125-метровой метеорологической вышке в Брукхэйвене (США, 1957). «На этом спектре хорошо выражен синоптический максимум при периоде $\tau \approx 4$ сут, объясняемый прохождением крупномасштабных атмосферных возмущений, обуславливающих изменение погоды». На этом спектре имеется и другой микрометеорологический максимум с периодом $\tau = 60$ сек. С небольшими

естественными отличиями эти опытные значения подтверждают теоретические оценки эйлеровых временных масштабов мега- и мезомолей. Длина $l_U = 4000$ км по порядку величины совпадает с размерами циклонов и антициклонов, занимающих всю высоту атмосферы. Можно считать, что эти мегамасштабные вихревые образования являются объединением двух мезомолей,двигающихся в противоположные стороны. Под действием силы Кориолиса эти вихревые образования в северном полушарии в основном вращаются против часовой стрелки, а в южных - наоборот. В физическом плане имеется очевидная аналогия между колебаниями расхода в реках и изменениями погоды в атмосфере, т.к. они одинаково оцениваются величиной τ_U . Дымовые шлейфы от больших пожаров распространяются в атмосфере в среднем на $3000 \div 4000$ км, после чего они исчезают, т.е. полностью рассеиваются. Эти данные еще раз подтверждают использование величины τ_U как горизонтальной длины пути перемешивания по вертикали. Общеизвестно, что достоверная длительность прогнозов погоды составляет 5 суток, что приблизительно равно теоретической оценке $\tau_U = 4,63$ сут. Таким образом, в физическом плане эта длительность определяется величиной τ_U как постоянной памяти атмосферы.

Характерными для равнинных речных потоков являются значения $C_U \gg 1$, $\lambda_U \ll 1$, $i \ll 1$, $Fr \ll 1$, $Re \gg 1$, $R \gg 1$. Тогда рассмотренные масштабы длины, времени, скорости, коэффициентов диффузии образуют «цепочки» существенных неравенств:

$$\begin{aligned} \frac{H}{C_U} (R)^{-3/4} &\ll \frac{H}{C_U} \ll H \ll H C_U^{2/3} \ll H C_U^2 = \frac{H}{\lambda_U} \ll \frac{H}{i \lambda_U} \\ \frac{H}{U} (R)^{-1/2} &\ll \frac{H}{U} \ll \frac{H}{U} C_U^{2/3} \ll \frac{H C_U^2}{U} = \frac{H}{i U} \ll \frac{H}{\Omega_U U} \\ u_* (R)^{-1/4} &\ll u_* \ll u_* C_U^{1/3} \ll U \\ \nu &\ll \frac{H u_*}{C_U} \ll H u_* C_U^{1/3} \ll \frac{H U}{\lambda_U} \ll \frac{H U}{\lambda_U Fr} \end{aligned}$$

Максимум максимум значений коэффициента турбулентной диффузии оказывается существенно меньше гидравлического коэффициента продольной диффузии глубины. Это еще раз подтверждает различие турбулентного и гидравлического описания. Суммарно турбулентное и гидравлическое масштабирование (представленное в форме цепочек) охватывает очень большие диапазоны количественного изменения пространственных и временных характеристик природных потоков. Для модельного речного потока это изменение происходит от колмогоровских масштабов до гидрологических в пределах $(10^{-2} \div 10^4)$ см - 9 порядков, $(10^{-2} \div 10^5)$ с - 7 порядков. Для атмосферы это изменение происходит от колмогоровских масштабов до релаксационных в пределах $(0,19 \div 4 \cdot 10^8)$ см - 9 порядков, $(0,25 \div 10^3)$ с - 6 порядков.

3 Некоторые применения масштабирования

Найденное масштабирование натуральных открытых потоков позволяет уточнить некоторые положения их гидравлики и турбулентности. При численном расчете одномерной дифференциальной гидравлической модели течения в открытом потоке возникает вопрос, как определить суммарный (приведенный) коэффициент Шези или коэффициент шероховатости для сложного составного сечения потока. Например, при расчете в рамках одномерной модели паводков, когда полное поперечное сечение потока представляет «сумму» речного русла и поймы. Схематично сложное сечение водного потока можно представить как сумму прямоугольных сечений с шириной B_i , глубиной H_i , коэффициентом Шези C_{Vi} , коэффициентом шероховатости n_i , $i = 1, 2 \dots N$, $N \geq 2$. Для потока с прямоугольным сечением $B \times H$ введем понятие релаксационного объема $W_{\text{рел}} = BHl_{\text{рел}} = B H^2 C_V^2$. В таком объеме жидкость полностью перемешивается по вертикали. В 2-D постановке полная площадь составного сечения с общей шириной B и средней глубиной H равна сумме площадей отдельных его частей $BH = \sum B_i H_i$. Совершенно аналогично в 3-D постановке положим, что полный релаксационный объем равен сумме релаксационных объемов частей $BH^2 C_V^2 = \sum B_i H_i^2 C_{Vi}^2$. Составное сечение приводится к прямоугольному, $B = \sum B_i$, $H = \sum b_i H_i$, $b_i = \frac{B_i}{B}$, $b_i < 1$, $\sum b_i = 1$. Тогда суммарный (приведенный) коэффициент Шези C_V определяется по формуле $C_V^2 = \sum b_i a_i^2 C_{Vi}^2$, $a_i = \frac{H_i}{H}$, $a_i < ; > 1$. Полная длина релаксация для составного сечения $l_{\text{рел}} = \sum b_i a_i l_{\text{рел } i}$, $\sum b_i a_i = 1$. Если для отдельных частей и всего сечения использовать формулу Маннинга с отдельными коэффициентами n_i , то для суммарного (приведенного) коэффициента шероховатости n получим $\frac{1}{n^2} = \sum \frac{b_i a_i^{7/3}}{n_i^2}$. В этой формуле величины n, n_i могут быть и размерными, и безразмерными. В литературе имеются различные формулы для приведенных коэффициентов Шези и шероховатости. Например, по Н.Д. Денисенко $n = (\sum b_i n_i^2)^{0.5}$, $n = \sum b_i n_i$ (для крайних степенных зависимостей коэффициента Шези). Общим для всех этих формул является то, что в них учитываются только относительные ширины отдельных частей. Использование отдельных частных релаксационных объемов развивает и уточняет известные подходы с помощью дополнительного учета относительных глубин.

В монографии В.В. Коваленко [4] приводятся натурные данные ряда исследователей (С.И. Коплан–Дикс, В.В. Дементьев, Иокоси, автор монографии), которые показывают, что в реках существуют случайные колебания расхода (и продольной скорости) с амплитудой порядка 10 % от среднего расхода (средней скорости) и с периодом в несколько десятков минут. Естественно встает вопрос о природе этих колебаний, в частности, являются ли они турбулентными или нет. По Д.И. Гринвальду «физическая природа колебаний с периодом 10 минут и более, связана скорее, с другими причинами,

чем с турбулентностью». В.В. Коваленко в определенной мере поддержал эту точку зрения, определив период этих колебаний с помощью гидравлической величины из уравнения Сен-Венана, - времени релаксации скорости τ_U , $T = \pi\tau_U$. По принятой терминологии В.В. Коваленко отнес указанные колебания к гидравлическости и считал, что они связаны с реальной флуктуацией гидравлических сопротивлений и морфологических характеристик натуральных потоков.

В найденной масштабизации величина τ_U одновременно определяет максимальный масштаб мегатурбулентности. Колебания скорости, которые принадлежат к микро-, мезо-, макротурбулентности имеют характерные периоды, меньшие элементарного гидравлического масштаба времени τ_E , и суммарно определяют средние значения коэффициентов Шези и гидравлического сопротивления, осредненные по указанным структурным уровням. Турбулентные колебания скорости, которые лежат в интервале τ_E, τ_U относятся одновременно к макро- и мегатурбулентности и к гидравлическости, поэтому могут определять флуктуацию гидравлических сопротивлений. Таким образом, с определенной модификацией можно согласиться с точкой зрения В.В. Коваленко на причины появления указанных низкочастотных колебаний расхода и продольной скорости. Однако эта точка зрения не единственная. Эйлеров временной масштаб атмосферной макротурбулентности равен $1000 \text{ с} = 16,7 \text{ мин}$. Следовательно, в фиксированном гидростворе в течение этого промежутка времени существует атмосферный макромоль, пульсационное движение в котором направлено в основном вниз и повышает атмосферное давление на поверхности водотока. В течение следующего такого же промежутка времени существует макромоль, пульсационное движение в котором направлено в основном вверх и понижает атмосферное давление на поверхности водотока. Наибольший эффект от колебания атмосферного давления достигается тогда, когда направление ветра и направление течения совпадают на расстояниях порядка 100 км (т.е. на расстоянии свободного пробега макромоля). Период колебания атмосферного давления составляет 33,4 мин и оказывается близким к суммарному интервалу колебаний расходов в разных реках ($10 \div 45$) мин [4]. Поэтому вполне вероятно, что низкочастотные колебания расхода и продольной скорости в реках определяются также атмосферной макротурбулентностью.

В работе [1] представлены в вертикальной плоскости осредненные мезомасштабные траектории жидких частиц в виде ломаных линий. При средней скорости движения частиц вверх-вниз, равной u_* , постоянной продольной скорости, равной U при $C_{Dz} = 10$, эти линии состоят из прямых отрезков, поочередно направленных вверх-вниз с вертикальной и горизонтальной проекциями $(\pm 0,1H, H)$ для модельного потока $(\pm 10 \text{ см}; 100 \text{ см})$. Объединение двух последовательных отрезков дает осредненное изображение волнообразных траекторий в вертикальной плоскости с длиной волны $2H$ (200 см). Дополнительный учет боковых пульсаций с интенсивностью u_* , действующей

ших вправо–влево, позволяет представить пространственную мезотраекторию как винтообразную линию с размером $0,1H$ и шагом $2H$. В развитой турбулентности на эту мезотраекторию наложена микромасштабная рябь с размером порядка колмогоровского масштаба длины $l_K = \frac{H}{C_U Re^{3/4}} = 0,01$ см.

Совершенно аналогично строятся осредненные макромасштабные траектории жидких частиц, которые движутся вверх–вниз со скоростью $\pm C_U^{1/2} u_*$ и проходят в этих направлениях всю глубину потока. В вертикальной плоскости отрезки ломаных имеют проекции $(\pm H, H C_U^{2/3})$, $(\pm 100$ см; 466 см). Длина макромасштабной волны $2H C_U^{2/3} = 926$ см. В соответствии с вышесказанным, эта длина близка к длине крупномасштабных гряд (высота которых $\sim 0,1H$, много меньше высоты макромасштабной волны, равной H). В пространстве макромасштабная траектория это винтообразная линия с радиусом H и шагом $2H C_U^{2/3}$. Макромасштабные турбулентные траектории жидких частиц определяют генезис песчаных гряд в натуральных потоках и «вписываются» в элементарный гидравлический объем (фактически – одной волной при $2 C_U^{2/3} \sim C_U \approx 10$).

Многочисленные опытные данные в водных потоках и в атмосфере показывают, что для пульсаций продольной скорости лагранжевы временные масштабы, т.е. масштабы на траекториях жидких частиц, существенно, в $5 \div 10$, раз превышают соответствующие эйлеровы временные масштабы в фиксированной точке, из которой выходят частицы. Для мезотурбулентности $\frac{t^L}{t^E} = C_U = (10; 20)$. Для макротурбулентности $\frac{t^L}{t^E} = C_U^{2/3} = (4,64; 7,37)$.

Микротурбулентные колебания слишком малы, чтобы влиять на указанные отношения. Мегатурбулентные колебания дают значения этого отношения порядка единицы. Поэтому большие значения отношения лагранжева и эйлерова временных масштабов определяются совместно мезо- и макроколебаниями скорости.

Вскоре после публикации основополагающей работы А.Н. Колмогорова по турбулентности Л.Д. Ландау опубликовал статью, в которой привел определение числа степеней свободы турбулентного потока $N_T \sim \left(\frac{L}{l_K}\right)^3 \sim Re^{9/4}$, где L - некоторый внешний масштаб турбулентности, соизмеримый с характерным размером потока. В монографии А.С. Монины и А.М. Яглома [5] эта оценка была уточнена $N_T \sim \left(\frac{Re}{Re_{кр}}\right)^{9/4}$, с тем, чтобы при $Re = Re_{кр}$ число степеней свободы было равно единице, т.е. числу степеней свободы ламинарного потока. Однако при $Re < Re_{кр}$ согласно уточненной оценке число степеней свободы ламинарного потока становится меньше единицы, в то время как это число должно быть тождественно равно единице.

В принятой стилизации турбулентности куб отношения прандтлевского масштаба длины к колмогоровскому равен $\left(\frac{l_{\text{ПФ}}}{l_{\text{К}}}\right)^3 = (\bar{R}^{3/4})^3 = (\lambda_U Re)^{9/4}$.

В ламинарном потоке $\lambda_U Re = \lambda_U^{\text{КП}} Re_{\text{КП}} = 3$. Поэтому окончательная общая формула числа степеней свободы, одинаково справедливая для турбулентных и ламинарных потоков, примет вид:

$$N_{\text{Т,Л}} = \left(\frac{\lambda_U Re}{\lambda_U^{\text{КП}} Re_{\text{КП}}}\right)^{9/4} = \left(\frac{\lambda_U Re}{3}\right)^{9/4} \quad (9)$$

Согласно этой формуле число степеней свободы турбулентного потока очень быстро возрастает с ростом числа Рейнольдса, а для ламинарного потока это число при любых числах $Re \leq Re_{\text{КП}}$ тождественно равно единице.

В рамках турбулентной структуры формула (9) фактически определяет число степеней свободы мезотурбулентности, равное числу колмогоровских микромолей с объемом $l_{\text{К}}^3$ в прандтлевском мезомоле с объемом $l_{\text{ПР}}^3$.

Совершенно аналогично число степеней свободы макротурбулентности равно числу прандтлевских мезомолей с объемом $\left(\frac{H}{C_U}\right)^3$ в макромоле с объемом H^3 , т.е. $N_{\text{МА}} = C_U^3 = (\lambda_U)^{-3/2}$.

Время существования мегамоля равно $\frac{HC_U}{u_*}$. За это время жидкие частицы, которые движутся в боковом направлении со скоростью u_* пройдут расстояние HC_U . Поэтому в широких водных потоках с $\beta \geq C_U$ и в атмосфере средние размеры мегамоля можно считать равными $HC_U^2 \times HC_U \times H$ (x, y, z). Его объем равен $H^3 C_U^3$. Одновременно это есть характерный релаксационный объем гидравлического описания, который в C_U^3 раз, т.е. во много раз больше элементарного объема такого описания, как в принципе и должно быть. Число степеней свободы мегатурбулентности равно числу макромолей в макромоле $N_{\text{МЕ}} = N_{\text{МА}} = C_U^3 = (\lambda_U)^{-3/2}$. Для модельного водного потока получим $N_{\text{Т,Л}} = 8,44 \cdot 10^7 \approx 10^2 Re$, $N_{\text{МА}} = N_{\text{МЕ}} = 10^3 \ll N_{\text{Т,Л}}$. Для атмосферы $N_{\text{Т,Л}} = 1,5 \cdot 10^{15} \sim 10^5 Re$, $N_{\text{МА}} = N_{\text{МЕ}} = 8 \cdot 10^3 \ll N_{\text{Т,Л}}$. Очевидно, что число степеней свободы для мега- и макротурбулентности неизмеримо меньше числа степеней свободы мезотурбулентности. Поэтому последнее число и принято за число степеней свободы всего турбулентного потока.

В иерархической структуре процесс переноса энергии турбулентности происходит с какого-то структурного уровня только на ближайший к нему нижний уровень, т.е. схематично мега \rightarrow макро \rightarrow мезо \rightarrow микро. Поэтому в принципе не возможен прямой переход, например, от макротурбулентности к микротурбулентности, и, соответственно, нельзя определять $N_{\text{Т}}$ как отношение $\left(\frac{H}{l_{\text{К}}}\right)^3$. Это замечание в определенной мере корректирует первоначальное предположение Л.Д. Ландау. При типичном значении $\lambda_U = 0,01$ получим

$N_T = 2,87 \cdot 10^{-6} (Re)^{9/4}$. По опытным данным А.П. Зегжды критические значения для перехода ламинарного течения в турбулентное $Re_{кр} = 794,10$;

$\lambda_{\nu}^{кр} = 3,78 \cdot 10^{-2}$. Тогда при указанном значении λ_{ν} , $N_T = 8,93 \left(\frac{Re}{Re_{кр}} \right)^{9/4}$. Таким образом, новая формула (9) для числа степеней свободы существенно уточняет ранее предложенные формулы.

Огромное, запоминающееся число 10^{15} (тысяча триллионов, ТТ) есть максимальное число, которое характеризует структуру турбулентности открытых потоков в земных условиях. В свою очередь, это число много меньше числа Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$), которое характеризует молекулярную структуру газа. Соответственно в атмосфере переход энергии турбулентности в тепло в колмогоровской микротурбулентности есть иерархический переход от молярной структуры «вещества» к молекулярной.

Заключение

В настоящей работе четко определены и упорядочены различные масштабы гидравлического и турбулентного описания природных открытых потоков, указан физический смысл этих масштабов. Многочисленность и разнообразие масштабов, большой диапазон изменения количественных значений пространственных и временных масштабов, позволяют представить большой, сложный, многосторонний, многофакторный процесс течения турбулентной жидкости в природных открытых потоках как некое единое, связанное и обозримое целое. В этом целом логично сочетаются как разработки автора, так и теоретические результаты и опытные данные ряда исследователей, которые с разных позиций изучали различные стороны течения, и, в ряде случаев, получали результаты на первый взгляд никак не связанные между собой.

Список использованных источников

1. Вербицкий В.С. Комплексная гидравлическая теория руслового процесса. Труды ВНИИГиМ, М. 1990. с. 177 – 238.
2. Вербицкий В.С., Кашин В.С. Расчеты по кинетической модели наносов. Сборник научных трудов ВНИИГиМ, М. 1987.
3. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М. Транспорт. 1990.
4. Коваленко В.В. Измерение и расчет неустановившихся речных потоков. Л. Гидрометеиздат. 1984.
5. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидродинамика. Ч.2. М. Наука. 1962.

УДК 627.01; 556.048; 627.8.04;

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ МЕЛКОЙ ВЗВЕСИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

М.А. Волынов

ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Москва, Россия

Мелкодисперсные наносы естественного происхождения (пылеватые и

илистые частицы), взвеси техногенного происхождения обладают весьма развитой поверхностью, высокой адсорбционной способностью и оказывают широкий спектр воздействий на качество речной воды, физико-механические характеристики русловых грунтов и устойчивость их к размыву вследствие кольматации и связывания более крупных частиц руслового грунта. По этим причинам процесс осаждения мелкодисперсных частиц в турбулентном водном потоке заслуживает пристального рассмотрения.

С научной точки зрения существующие теории руслового процесса, как гравитационная так и диффузионная, не дают объяснения тому как происходит осаждение мелких частиц на дно потока в условиях действия турбулентных пульсаций скорости. По существующим представлениям частицы могут осаждаться на дно только при тех режимах течения, при которых скорость осаждения взвеси превосходит вертикальные турбулентные пульсации скорости [1]. Вместе с тем имеющиеся данные о скорости осаждения (иначе о гидравлической крупности) частиц [2] указывают на крайне малую величину скорости осаждения мелких частиц, которая при диаметрах частиц менее 0,05 мм не превышает 1 мм/с [3].

Очевидно, что при турбулентном течении даже с весьма малыми скоростями порядка 0,2 м/с интенсивность вертикальных пульсаций скорости будет превосходить гидравлическую крупность частиц мелкой взвеси, препятствуя её осаждению на дно. Вместе с тем, исследования гранулометрического состава русловых грунтов равнинных рек обнаруживают повсеместное присутствие мелкодисперсных частиц в русловых отложениях [4], что указывает на осаждение частиц мелкой взвеси в турбулентных водных потоках [5]. Таким образом, рассмотренная схема осаждения частиц мелкой взвеси в турбулентном водном потоке требует серьезного изменения и усовершенствования.

Эти изменения могут быть получены при сопоставлении размера мелких частиц с толщиной вязкого подслоя, в пределах которого имеет место преимущественно вязкое (ламинарное) течение и отсутствуют турбулентные пульсации скорости. По разным оценкам [6] безразмерная величина, которая обычно используется в качестве характеристики толщины вязкого подслоя u_* составляет от 10 до 70. Принимая среднее значение этой величины при вязкости воды 10^{-6} м²/с и динамической скорости, не превышающей для равнинных рек 0.1 м/с, найдем, что для этих условий толщина вязкого подслоя достигает 40 мм.

Таким образом, осаждение частиц взвеси не только мелких, но также и песчаных будет происходить в пределах вязкого подслоя при отсутствии взвешивающего действия вертикальных пульсаций скорости. Это важное обстоятельство ускользало от внимания исследователей и не учитывалось при рассмотрении седиментационных процессов в турбулентных потоках. Оно разрешает отмеченный выше парадокс, исключаящий саму возможность осаждения мелкой взвеси в турбулентном потоке.

На конечной стадии осаждения частиц мелкой взвеси в вязком подслое

начинают играть роль когезионные силы, дальность действия которых составляет 1-2 микрона [7, 8]. Уравнение, описывающее осаждение частиц взвеси в зоне вязкого подслоя, можно записать в виде (рис. 1):

$$h dc = -cW dt, \quad (1)$$

где h – глубина; W – гидравлическая крупность частиц взвеси; c – объемная концентрация взвеси.

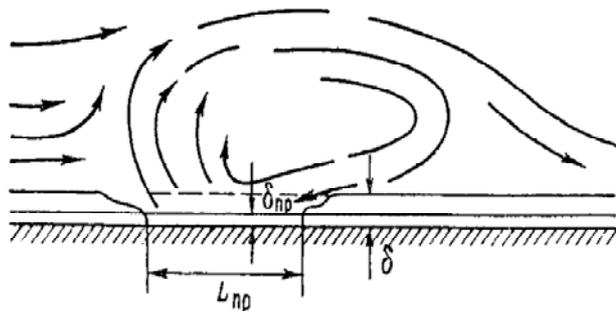


Рисунок 1 - Схема к расчету осаждения частиц мелкой взвеси

Используя граничное условие ($t = 0, c = c_0$) решение уравнения можно получить в виде:

$$\frac{c}{c_0} = e^{-Wt/h}. \quad (2)$$

Решение показывает, что при уменьшении глубины потока интенсивность осаждения возрастает, что подтверждают данные измерений донных отложений в речных руслах [9, 4]. При этом подача взвеси на верхнюю границу вязкого подслоя осуществляется из толщи потока действием механизма турбулентной диффузии. При остаточной концентрации взвеси $c = 0,05c_0$ величина $Wt/h = 3$, что позволяет оценить период практически полного осаждения мелкой взвеси в потоке и определить таким образом длину загрязненного участка водотока L_0 ниже выпуска сточных вод или устья притока, поставляющих мелкую взвесь в основной поток:

$$\frac{L_0}{h} = \frac{3V}{W}. \quad (3)$$

где V – средняя скорость потока.

С учетом известного соотношения между средней и динамической скоростью [10] можно записать:

$$\frac{L_0}{h} = \frac{8,5}{\sqrt{\lambda}} \frac{u_*}{W}. \quad (4)$$

Для коэффициента гидравлического сопротивления речного русла близкого к $\lambda = 0,04$ для частиц $d=0,01$ мм протяженность участка осаждения составит около 10 км, что подтверждается данными обследования речных русел [11].

Известно, что вязкое течение в подслое периодически нарушается и

строго говоря, течение в подслое является перемежающимся [12]. В моменты разрушения подслоя происходят выбросы придонных масс жидкости в толщу потока, при которых может происходить срыв и взвешивание осевших частиц, однако этому будут препятствовать в значительной мере когезионные силы, связывающие осевшие частицы с русловым грунтом. Можно предположить, что эти силы будут захватывать все частицы мелкой взвеси, приближающиеся к дну на расстояние меньшее радиуса действия когезионных сил, что указывает на возможность осаждения этих частиц так же и в зоне выбросов масс жидкости из вязкого подслоя в толщу потока.

Учитывая неразрывность пульсационных движений [13], и рассматривая схему плоского течения будем считать, что область выброса из подслоя замещается массой жидкости, насыщенной взвесью, за счет продольной пульсации скорости. Принимая продольный размер зоны выброса равным макромасштабу вертикальных пульсаций, который по данным [14], близок к $h/2$, и средний стандарт продольных пульсаций равным $2u_*$, получим следующую оценку времени восстановления мутности в зоне разрушения подслоя [15]:

$$t_p = \frac{h/2}{u'} = \frac{h}{4u_*}. \quad (5)$$

Поскольку интенсивность турбулентного массообмена определяется в основном крупномасштабными вихрями, произведём сравнение найденного периода восстановления мутности с периодом цепочки крупных вихрей [16], а именно:

$$T_c = \frac{h}{V} \frac{2}{\lambda^{1/3}},$$

Соотношение периодов оказывается равным:

$$\frac{t_p}{T_c} = \frac{Vh}{4u_*} \frac{\lambda^{1/3}}{2h} = \frac{1}{8} \frac{\sqrt{8}}{\lambda^{1/6}}. \quad (6)$$

При средней величине $\lambda \approx 0,03$ периоды оказываются близкими, и за один период прохождения крупномасштабной структуры произойдет только однократное осаждение частиц из слоя толщиной в два микрона. Если толщину этого слоя считать близкой к диаметру частиц взвеси, то поток взвеси на дно оказывается равным cd/T_c . Поскольку осаждение в зоне существования подслоя происходит с интенсивностью cW , сопоставляя эти потоки получим:

$$\frac{cW}{cd/T_c} = \frac{WT_c}{d} = \frac{2}{\sqrt{8}} \frac{W}{u_*} \frac{h}{d} \lambda^{1/6}. \quad (7)$$

Соотношение показывает, что при средних значениях λ , $W \approx u_*$ и $h/d \gg 10$, осаждение взвеси в зоне выброса массы из вязкого подслоя мало и может не учитываться. Это позволяет не производить коррекцию ранее сделанных оценок.

В связи с нестационарностью течения в вязком подслое скорости в этой зоне могут существенно возрастать в моменты, предшествующие вы-

бросу массы жидкости из вязкого подслоя в толщу потока. В эти моменты времени возможно как осаждение частиц, так и размыв с перемещением частиц по дну в режиме перекачивания. Такой режим движения характерен для крупных частиц из общего механического состава оседающей мелкой взвеси. Ситуация будет в значительной мере определяться соотношением между продолжительностью осаждения частиц в периоды между выбросами из вязкого подслоя и интервалом времени между выбросами. Если интервалы между выбросами меньше периода осаждения частиц возможен периодический переход из режима осаждения к размыву дна и взвешиванию частиц донного грунта. Этому режиму отвечает следующее условие:

$$\frac{1}{5,3 \cdot 10^{-3}} \frac{\nu}{u_*^2} < \frac{\delta_b}{W},$$

которое при $\delta_b = 10 \frac{\nu}{u_*}$ упрощается до:

$$\frac{u_*}{W} > 18,9. \quad (8)$$

где δ_b – толщина вязкого подслоя.

Учитывая, что рассматривается режим, при котором происходит перемежаемость взвешивания и осаждения частиц в вязком подслое можно предполагать, что этот режим близок к критическому, при котором:

$$\frac{u_*}{W} = \frac{u_*^2 d}{\nu} < 1 \quad (9)$$

Из сопоставления выражений (8) и (9) можно получить следующее условие $\frac{u_* d}{\nu} < 0,05$, которое показывает, что крупность частиц, находящихся в перемежающемся режиме движения, более чем на порядок меньше толщины вязкого подслоя.

Список использованных источников

1. Михайлова Н.А. Перенос твёрдых частиц турбулентными потоками воды. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 232 с.
2. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Энергия, 1988. 624с.
3. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Изд-во АН СССР. М., 1958.
4. Шамов Г.И. Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 346 с.
5. Мухамедов А.М., Бочарин А.В., Мухамедов Я.М. К вопросу осаждения наносов в донном потоке // Вопросы гидротехники. 1965. вып. 2
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974 711 с.
7. Дерягин Б. В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // Сб. физич. наук, 1958. №64. 493-528 с.
8. Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами.

// ЖЭТФ.-1955.-Т.29.- №1.-С.94-112

9. Лелявский С. Введение в речную гидравлику. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 228 с.
10. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 222 с.
11. Волинов М.А., Брянская Ю.В., Байков В.Н. Распределение скоростей и гидравлическое сопротивление при течении в трубах, каналах и речных потоках // Гидротехническое строительство. 2011. №3. С. 36-39.
12. Хинце И.О. Турбулентность, её механизм и теория. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
13. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и её измерение. М.: Мир, 1974. 278 с.
14. Лятхер В.М. Турбулентность в гидросооружениях. М., Энергия, 1968. 408 с.
15. Bec J., Biferale L., Scagliarini A., Lanotte A.S., Toschi F. Turbulent pair dispersion of inertial particles quantitative measurement of the lifetime of localized turbulence in pipe flow // Journ. Fluid Mech. 2010. V.645. P. 497-528.
16. Железняков Г.В., Дебольский В.К. О грядовом движении наносов при их различной плотности // Доклады Всесоюзн. Академии с-х наук. М.: Колос, 1971.

УДК. 626.823.88.004

НОВЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИФОННЫХ ВОДОВЫПУСКОВ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ СРЫВА ВАКУУМА

О.Я. Гловацкий, М.А. Шомайрамов

НИИИВП, Минсельводхоз Республики Узбекистан, г.Ташкент, Узбекистан

Сифонные водовыпуски на насосных станциях (НС) впервые появились в середине прошлого столетия. Однако широкого распространения в этот период они не получили, т.к. не был надежно решен вопрос о зарядке и разрядке сифона во время его работы. На сифонных водовыпусках НС нельзя допускать обратного излива воды из отводящего канала до обнажения козырька, поэтому потребовалась установка специальных клапанов для срыва вакуума (КСВ) для разрядки сифона в момент остановки насоса. Поиски надёжной конструкции клапанов надолго задержали распространение сифонных водовыпусков на НС ввиду низкой надёжности КСВ с механическим и электрическим приводом. Они были применены на водовыпускных сооружениях Карповской и Варваровской НС Волго-Донского канала, на НС каналов Северный Донец - Донбасс, Днепр - Кривой Рог, Иртыш-Караганда и ряде других. С 1975 г. ВНИИГиМ совместно с узбекскими учёными проводил работы по созданию новых КСВ [1].

Установлено, что КСВ являются весьма ответственной деталью сифонного водовыпуска. К нему предъявляются следующие требования:

- а) надёжность и долговечность в работе;
- б) быстрота действия, автоматичность работ;
- в) герметичность, минимум гидравлических сопротивлений;
- г) простота конструкции и малая стоимость.

В настоящее время предложено много конструкций КСВ, которые можно классифицировать по принципу действия и роду привода:

- I. Механические.
- II. Гидромеханические.
- III. Гидравлические.
- IV. Смешанные.

ВНИИГиМ с участием авторов провёл серию натурных испытаний насосных агрегатов № 5 и 6 НС-1 Каршинского магистрального канала (КМК), оборудованных гидравлическими устройствами для срыва вакуума (ГУСВ).

Гидравлическое устройство такой серии состояло из воздуховодной трубы (ВТ) 2 и гидравлического затвора (рис.1). ВТ монтируется в конце напорного трубопровода ниже вакуумной зоны на величину скоростного напора в сечении, где она установлена. Размер сечения ВТ принимается 7-8 % от размера сечения напорного трубопровода.

Гидравлический затвор выполнен в виде скоростной трубы (СТ) 3, смонтированной внутри сифона I. СТ состоит из стояка, установленного в горловом сечении сифона, и нижней ветви, которая монтируется по низу восходящей ветви сифона открытым концом навстречу потоку воды. Входное сечение СТ размещается на отметке ниже $УВВБ_{\max}$ в отводящем канале на 1-1,4 м [2].

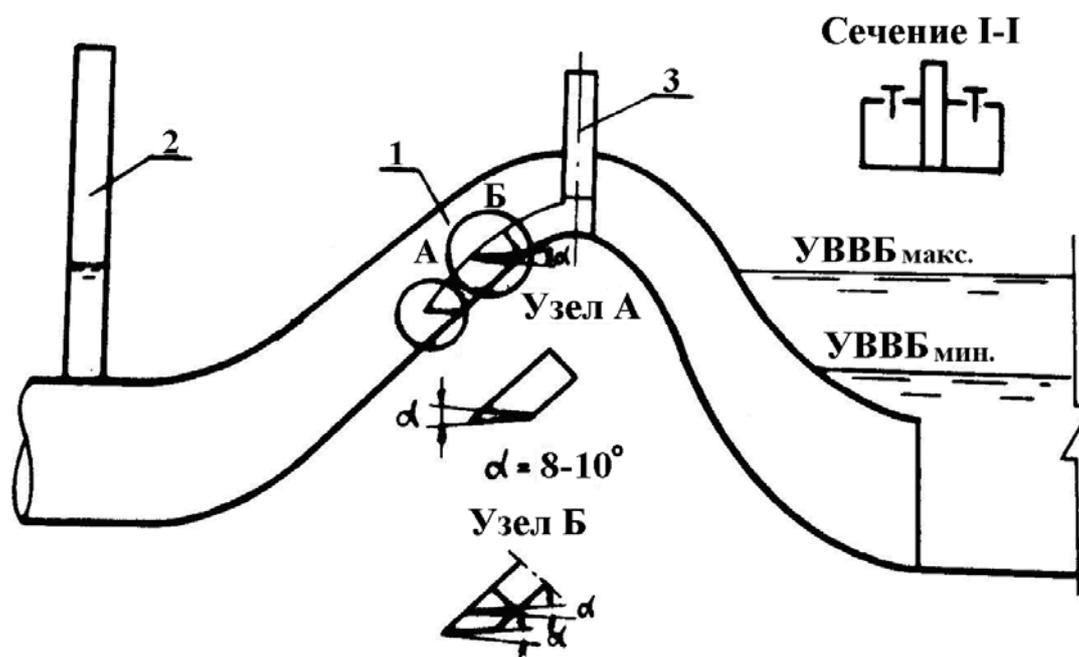


Рисунок 1 - Схема ГУСВ конструкции КМК:

- 1- Восходящая ветвь сифона; 2- Воздуховодная труба; 3- Скоростная труба;
- 4 - Клапаны-вантузы

Размер сечения СТ принят 2% от размера сечения горловины сифона.

При пуске насоса и заполнении напорного трубопровода водой основная масса воздуха выходит через ВТ и СТ. После затопления их входных сечений оставшаяся часть воздуха в сифонном водовыпуске при его дальнейшем заполнении водой удаляется через вантузы. ВТ 2 и гидравлический затвор 3 работает по принципу трубки Пито, в которой роль динамической

трубы выполняет СТ, а статистической (пьезометр) – выполняет ВТ. Вантузы, установленные на капоре сифона, служат для выпуска воздуха из полости сифона, т.е. они работают только при пуске насоса. При остановке насоса через гидравлический затвор воздух врывается в полость сифона и, распространяясь по потоку восходящей ветви сифона, доходит до ВТ, оголяет ее входное отверстие и дает возможность атмосферному воздуху в большом количестве поступать во внутреннюю полость сифонного водовыпуска. Это приводит к срыву вакуума в сифоне, разрыву сплошности потока в горле сифона и прекращению поступлению воды из отводящего канала в напорный трубопровод и далее в подводящий канал.

Наличие в СТ выреза треугольной формы позволяет создать циркуляцию потока через начальный участок трубы. Перед выходом из выреза поток делает поворот на 90° , что приводит к повышению давления на столб воды в СТ и к повышению его уровня. Наличие более высокого уровня воды позволяет СТ разместить в сифонном водовыпуске на более высоких отметках по отношению к минимальному уровню в отводящем канале. При остановке насоса скоростной напор перестает действовать, уровень воды в СТ опускается и достигает треугольного выреза, через который начинает поступать атмосферный воздух в вакуумную зону сифона. Это приводит к снижению вакуума и к понижению уровня воды в СТ.

Когда вода опускается до входного сечения, начинается более интенсивное поступление воздуха в сифон, а когда освобождается вход воздуха через ВТ, происходит срыв вакуума. Таким образом, применение ГУСВ сифонного водовыпуска НС позволит уменьшить гидравлическое сопротивление входного отверстия СТ.

Натурные испытания, проведенные с участием авторов на НС-1 КМК, показали, что при $УВВБ_{\max} = 22,2$ зафиксирован надёжный срыв вакуума при уменьшении времени обратного вращения агрегатов до 45-50 с, по сравнению с ранее отмечаемым временем 70-78 с. Новые конструкции ГУСВ внедрены на НС М-2 КМК и НС "Шерабад" в Узбекистане. Зафиксирована абсолютная герметичность. Потребление электроэнергии НС "Шерабад", оборудованной насосами ОП11-185, при расчетном вакууме 4 м увеличится при потере вакуума в сифоне на 26 % за счет увеличения напора и еще на 4 % вследствие смещения режимной точки в зону характеристики с меньшим КПД.

С целью гарантированного повышения надежности работы НС при остановке при любых возможных режимах авторами предложены новые ГУСВ (рис. 2).

Напорный трубопровод 1 сопрягается с восходящей ветвью сифона 2, заканчивающейся гребнем сифона 3 и переходящей в нисходящую ветвь сифона 4, заглубленную под уровень УВВБ напорного бассейна 5. В концевой части трубопровода 1 сверху жестко установлена ВТ 6 [3]. В зоне положительного давления сифона при максимальном уровне напорного бассейна 5 размещен КСВ в виде вакуум-бака 7, сообщающегося с проточной частью

при помощи входящей внутрь вакуум-бака 7 трубы 8. Дно вакуум-бака 7 выполнено воронкообразным для обеспечения слива воды в трубопровод 1. Химические камеры 9, 10, заполненные химическими реактивами, гидравлически соединены с реакционной емкостью 11, расположенной в верхней части вакуум-бака 7. Трубка 8 снабжена вентилем 12 с электроприводом. На восходящей ветви сифона 2 вблизи гребня 3 расположен датчик направления течения 13.

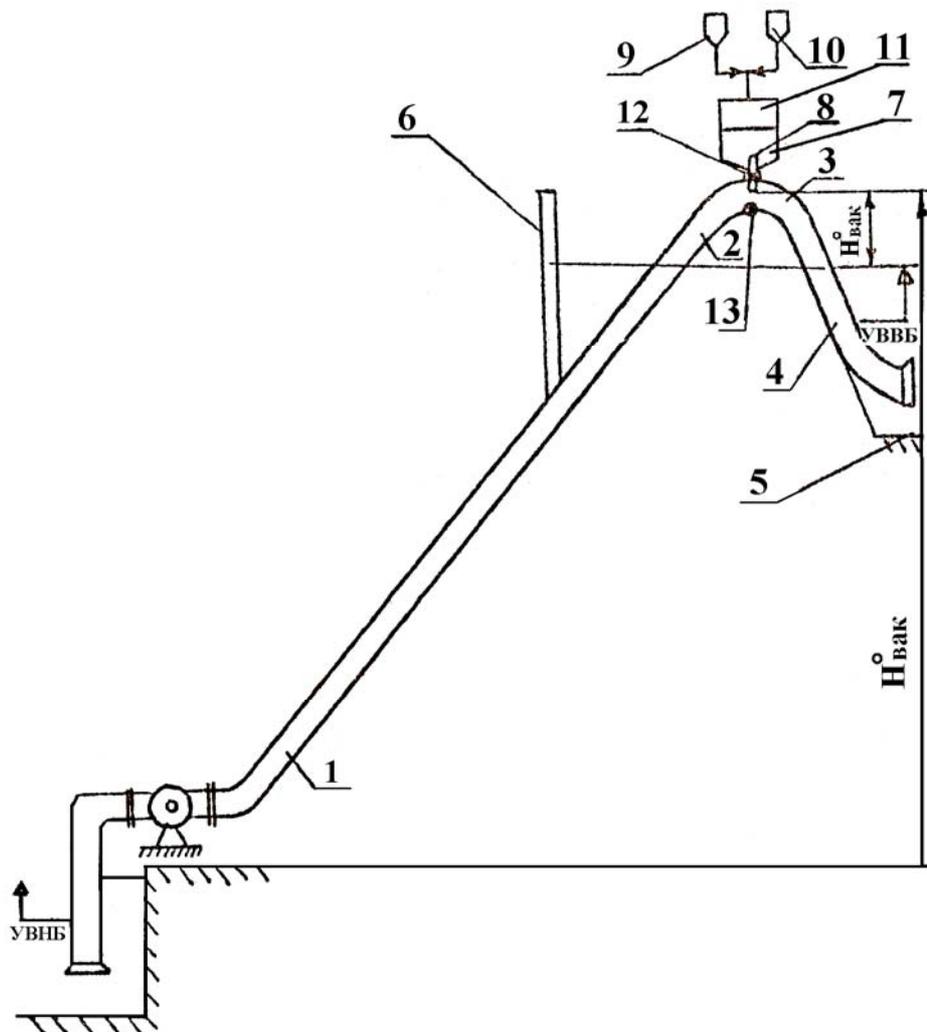


Рисунок 2 - Сифонный водовыпуск с вакуум-баком

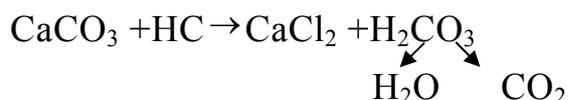
При пуске насоса вода начинает поступать в трубопровод 1, вытесняя воздух через ВТ 6. Оставшиеся в проточной части воздух поступает по трубке 8 в вакуум-бак 7, который служит гидравлическим амортизатором волн повышения и понижения давления, наблюдающихся в режимах пуска-остановки насоса. При вытеснении воздуха происходит полная зарядка сифона. Оставшийся в нижней части вакуум-бака 7 некоторый объем воздуха регулируется напором, соответствующим рабочим параметрам насоса.

При отключении насоса под действием силы тяжести в нисходящей ветви 4 сифона и под действием силы инерции в восходящей 2 и нисходящей 4 ветвях сифона вода продолжает двигаться в прямом направлении. Столб

воды в напорном трубопроводе 1 под действием силы тяжести вначале останавливается, а затем начинает движение в обратную сторону. Этому явлению предшествует снижение напора, развиваемого насосом из-за постепенного снижения оборотов насоса. При этом величина вакуума в сифоне резко возрастает и определяется разностью отметок гребня сифона 3 и уровня воды в аванкамере. При небольших колебаниях уровня воды в напорном бассейне 5 (УВВБ), когда опорожнение в объеме столба в ВТ 6 происходит до начала обратного течения воды из сифона, полость трубопровода 1 сообщается с атмосферой и происходит срыв вакуума. Однако при высокой отметке УВВБ обратное течение воды из сифона начинается прежде, чем из ВТ 6 вытечет вода без срыва вакуума в сифоне.

С целью ускорения срыва вакуума до начала обратного течения воды выше пьезометрической линии, то есть всегда в зоне вакуума, предусмотрен вакуум-бак 7, соединенный с полостью сифона трубкой 8. При работе насоса и расчетной величине давления в сифоне P_1 объем воздуха в вакуум-баке V_1 . После остановки насоса, когда величина вакуума в сифоне резко возрастает (давление $P_2 < P_1$) объем воздуха в соответствии с законом Бойля-Мариотта $P_1V_1 = P_2V_2$ также возрастает, и воздух через трубку 8 попадет в полость сифона. Под действием силы тяжести обратный поток воды в восходящей ветви 2 сифона будет расширять попавший в полость сифона воздух вплоть до полного разрыва сплошности обратного потока.

Увеличение объема воздуха, поступающего из вакуум - бака 7 может достигаться с помощью искусственного газового потока, создаваемого в момент остановки насоса путем химической реакции компонентов, складированных в камерах 9 и 10. Например, для получения искусственного газового потока двуокиси углерода могут быть использованы химические реакции взаимодействия щавелевой кислоты с карбонатом натрия или разложения природного карбоната кальция (технического) путем воздействия на него соляной кислоты



Выделяющийся газообразный CO_2 скапливается в резервуаре 11 и в нужный момент через вентиль 12 пропускается навстречу обратному потоку воды.

Показания датчика направления течения 13 при прямом токе воды после пуска насоса дают импульс на образование газовой смеси, а при подаче обратного тока воды при остановке насоса дают импульс на открытие вентиля 12 и срыва вакуума. Расположение датчика 13 вблизи гребня 3 сифона оптимизирует время впуска искусственного потока газа в момент образования разрыва сплошности обратного потока.

Химические компоненты расположены в обойме, передвигающейся в реакционную ёмкость 11 на одно деление, обеспечивающее контакт с порцией другого компонента в количестве, необходимом для образования искусственного газового потока, интенсифицирующего поступление воздуха из

вакуум-бака 7 до момента опорожнения ВТ 6 и срыва вакуума. Объем искусственного газового потока зависит от параметров насоса и трубопровода 1.

Оптимизация временного интервала срыва вакуума и объема газового потока может быть достигнута путем установки нескольких датчиков направления течения на восходящей ветви 2. По рекомендациям авторов вакуум-бак внедрён в сифонном водовыпуске крупной НС «Абай» в Казахстане.

Предлагаемые способы срыва вакуума позволяют добиться максимального повышения надежности и расширить диапазон срабатывания ГУСВ в сифонном водовыпуске НС [4].

Список использованных источников

1. Рекомендации по проектированию сифонных водовыпускных сооружений насосных станций // ВНИИГиМ, М., 1982.
2. А.с. № 968153. Заявитель ВНИИГиМ. Бюллетень № 39, 1982.
3. А.с. № 1791519. Заявитель ТИИМСХ. Бюллетень № 4, 1993.
4. Шомайрамов М.А. Конструкции сифонных водовыпусков с устройствами срыва вакуума //Сельское хозяйство Узбекистана. Ташкент, 2008. -№3. –с. 25-26.

УДК 626.823

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ И ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Кушер А.М.

ФГБНУ "ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова", г. Москва, Россия

Выбор гидрометрического сооружения и его геометрии зависит от гидравлики и геометрии подводящего канала, уклона, а также от требований устойчивости к заилению канала, допустимого подъема уровня верхнего бьефа, устойчивости к затоплению со стороны нижнего бьефа и ряда других метрологических и эксплуатационных факторов. Существующие рекомендации носят ориентировочный характер, не обеспечивая точную оценки работы сооружений. Физическое (лабораторное) моделирование не позволяет соблюсти критерии подобия лабораторного и натурного потока, что приводит к необходимости введения запаса в рекомендуемые параметры. Например, в существующих рекомендациях коэффициент предельного затопления прямоугольного гидрометрического лотка критической глубины равен $S_{пр} = 0.7$, что имеет место при резком изменении уровня нижнего бьефа. Однако экспериментом установлено, что при плавном подъеме уровня воды (например, при частичном закрытии затвора в отводящем канале) затопление не наступает вплоть до $S_{пр} = 0.82-0.85$.

Альтернативой (скорее дополнением) физического моделирования является численный расчет трехмерного потока на основе уравнений Навье-Стокса в области, включающей сооружение и сопряженные каналы. Разработанный ранее в лаборатории гидрометрии ВНИИГиМ метод и специали-

зированной пакет выбора и расчета гидрометрических сооружений DISCO позволяет исследовать работу сооружений в стационарном режиме [1].

Более глубокое исследование влияющих факторов в натуральных условиях требует существенного усложнения и модернизации разработанных программных модулей. Во избежание дублирования существующих решений был проведен анализ параметров наиболее продвинутых пакетов трехмерного численного моделирования потока жидкости и газа. Для получения расходной зависимости необходим циклический расчет гидравлики потока при разных граничных условиях в серии сооружений с разной геометрией без (или с минимальным) участием оператора. Поэтому исследовались точность расчета расхода, возможность работы с командной строки (для включения в пакетный файл), наличие и автоматизация применения средств препроцессинга (подготовки краевых условий и расчетной трехмерной сетки), затраты машинного времени и необходимая квалификация пользователя.

В данной статье рассмотрены результаты проведенных исследований, касающиеся применения некоммерческого пакета вычислительной гидродинамики OpenFoam и, более подробно, вопросов подготовки расчетной сетки для вычисления гидравлики открытого потока. Пакет функционирует в операционной системе Linux. Версия OpenFoam для Windows имеет ряд ограничений и существенно меньшую производительность. Язык программирования – C++. Привлекательной стороной OpenFoam является наличие и открытость кодов большого числа граничных условий для скорости, давления и параметров турбулентности [2]. Имеется большое количество служебных команд, позволяющих подстраивать решение в зависимости от поставленных задач. К недостаткам комплекса следует отнести малый объем документации, что затрудняет его применение специалистами, не обладающими достаточными знаниями в области программирования и вычислительной гидродинамики. Для решения осредненных по времени уравнений Навье-Стокса (RANS), как и в большинстве коммерческих пакетов, используется метод конечных объемов МКО. Достоинством этого метода является интегральная формулировка законов сохранения. В этом методе потоки (массы, количества движения, энергии и другие) вычисляются через грани ячеек расчетной сетки. Помимо ошибок, вызванных применением аппроксимирующих соотношений для потоков через грани ячеек, источником погрешностей являются способы дискретизации расчетной области. Многочисленными экспериментами установлено, что наименьшая ошибка расчета потоков имеет место на структурированной ортогональной сетке, что связано с точностью вычисления направления нормалей к граням ячеек. Возможность дискретизации сложной геометрии на неструктурированной сетке с треугольными или многоугольными ячейками несущественна по отношению к большинству гидрометрических и водопропускных сооружений, имеющих достаточно простую форму. Главным требованием является точность расчета расхода. Кроме того, применение структурированных сеток обеспечивает уменьшение затрат машинного времени и необходимого объема оператив-

ной памяти компьютера.

Для расчета сетки в составе OpenFoam есть два солвера: blockMesh для создания структурированной сетки из отдельных блоков и snappyHexMesh для неструктурированной сетки с многоугольными ячейками. Исходные данные задаются в файлах-словарях blockMeshDict и snappyHexMeshDict. В отдельных секциях словаря blockMeshDict задаются координаты вершин ячеек, блоки (ячейки) в виде списков порядковых номеров вершин и внешние стороны расчетного домена в виде списка патчей, каждый из которых является списком вершин граней, принадлежащих конкретному патчу. Каждая грань блока задается списком номеров 4-х вершин, перечисленных в порядке обхода вершин против часовой стрелки относительно конца внешней нормали к грани. Учитывая сложный алгоритм задания параметров сетки и необходимость индивидуального описания тысяч ячеек, создание структурированной сетки реального сооружения вручную является сложной и практически невыполнимой задачей.

В составе OpenFoam присутствуют конвертеры форматов большого числа программ-генераторов трехмерной неструктурированной сетки (Gmsh, Netgen, Salome, Gambit и другие). За исключением Gmsh все программы не работают с командной строки, что требуется для управления расчетом внешней программой. Коммерческий генератор сетки Pointwise имеет модуль создания структурированной сетки в формате OpenFoam, но, как показали эксперименты, имеет ограничения в части сложности геометрии сетки. Основным препятствием для его использования является управление расчетом только с графического интерфейса пользователя.

Учитывая изложенное, был разработан программный комплекс, обеспечивающий создание структурированной трехмерной сетки; расчет и задание граничных и начальных условий; расчет гидравлики потока со свободной поверхностью с применением солвера 'interFoam' без вмешательства оператора по заданным до начала расчета параметрам. В дальнейшем планируется его включение в качестве модуля в общий программный комплекс расчета гидрометрических и водопропускных сооружений, управляемый с общего графического интерфейса. В состав указанного комплекса включены следующие модули:

1. Flume – гидрометрический лоток или водослив с широким порогом (горизонтальное и (или) вертикальное сжатие поперечного сечения канала. Длина секций больше нуля. Расчет общей продольной дискретизации домена производится по заданной дискретизации контрольной секции. Шаг дискретизации по вертикали Z вблизи дна уменьшается в геометрической прогрессии. Продольный (по X) уклон дна – произвольный. Параметры геометрии – от внешней программы.

2. Weir (thin-plate weir) – водослив с тонкой стенкой (единственное вертикальное сжатие поперечного сечения канала). Толщина вертикальной стенки равна заданному минимальному шагу дискретизации в продольном направлении (шаг дискретизации вблизи стенки уменьшается в геометриче-

ской прогрессии). Расчет продольной дискретизации домена выполняется по заданной дискретизации подводящей секции (при её отсутствии - по средней длине отводящих секций). Дно - горизонтальное.

3. Free Overfall – перепад со сжатой струей. Перед и за стенкой перепада ширина отводящего канала равна ширине подводящего. На вертикальной стенке под ребром перепада создается поперечная щель для доступа воздуха высотой 2 шага дискретизации по вертикали. Расчет продольной дискретизации домена выполняется по заданной дискретизации подводящей секции (при её отсутствии - по средней длине отводящих секций). Шаг дискретизации вблизи ребра по X и Y уменьшается в геометрической прогрессии. Дно - горизонтальное.

4. Overfall – перепад с несжатой струей. Ширина отводящего канала больше ширины подводящего. Окно на вертикальной стенке отсутствует. Расчет продольной дискретизации домена выполняется по заданной дискретизации подводящей секции (при её отсутствии - по средней длине отводящих секций). Шаг дискретизации вблизи ребра по X и Y уменьшается в геометрической прогрессии. Дно - горизонтальное.

5. Gate (Sluicgate) – щитовой затвор. Расчет продольной дискретизации домена выполняется по заданной дискретизации подводящей секции (при её отсутствии - по средней длине отводящих секций). Толщина вертикальной стенки равна минимальному шагу дискретизации в продольном направлении. Шаг дискретизации вблизи стенки щита по X и Y уменьшается в геометрической прогрессии. Дно - горизонтальное.

6. Mix – комбинация конструкций с горизонтальным дном. Расчет продольной дискретизации домена выполняется по средней длине секций. Может включать: лоток кр. глубины, водослив с ш.п., водослив с т.с., перепад, щитовой затвор, лоток Реплогла, водослив Крампа, лоток без горловины.

7. Pipe – (труба) (круглая, трапецеидальная с произвольным изгибом). Поперечный размер (диаметр)- переменный по длине. Уклон дна - произвольный. Для моделирования напорного потока.

8. All – комбинация типов конструкций с произвольным уклоном дна (в каждой зоне без уклона - не более одного щитового затвора и водослива с тонкой стенкой. Может включать: лоток кр. глубины, водослив с ш.п., водослив с т.с., перепад, щитовой затвор, лоток Реплогла, водослив Крампа, лоток без горловины, кульверт, сифон. Зоны с уклоном обрабатываются по алгоритму Pipe. Число перепадов дна, лотков, диафрагм - произвольное. Число перепадов с щелью в домене – не более одного, так как вертикальные размеры и координаты щели вычисляются один раз для максимального отрицательного перепада по Z.

9. Orifice – расходомерная диафрагма в трубе для напорного потока. Уклон дна равен нулю, подводящего и отводящего водоводов - произвольный. Шаг X - дискретизации вблизи стенки диафрагмы уменьшается в геометрической прогрессии.

На рисунке 1 приведена разряженная для наглядности расчетная сетка

для расчета гидрометрического лотка критической глубины в прямоугольном канале.

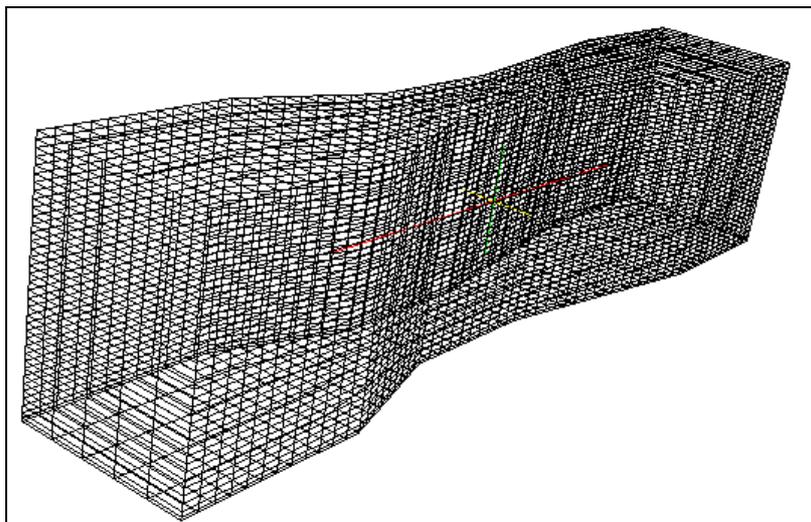


Рисунок 1 - Трехмерная сетка для расчета гидрометрического лотка критической глубины в прямоугольном канале (визуализация - в Paraview)

На рисунке 2 приведен график расчетного домена с внешними патчами, на которых заданы граничные условия для расчета гидравлики потока при заданном уровне воды в верхнем бьефе и свободном истечении в нижнем.

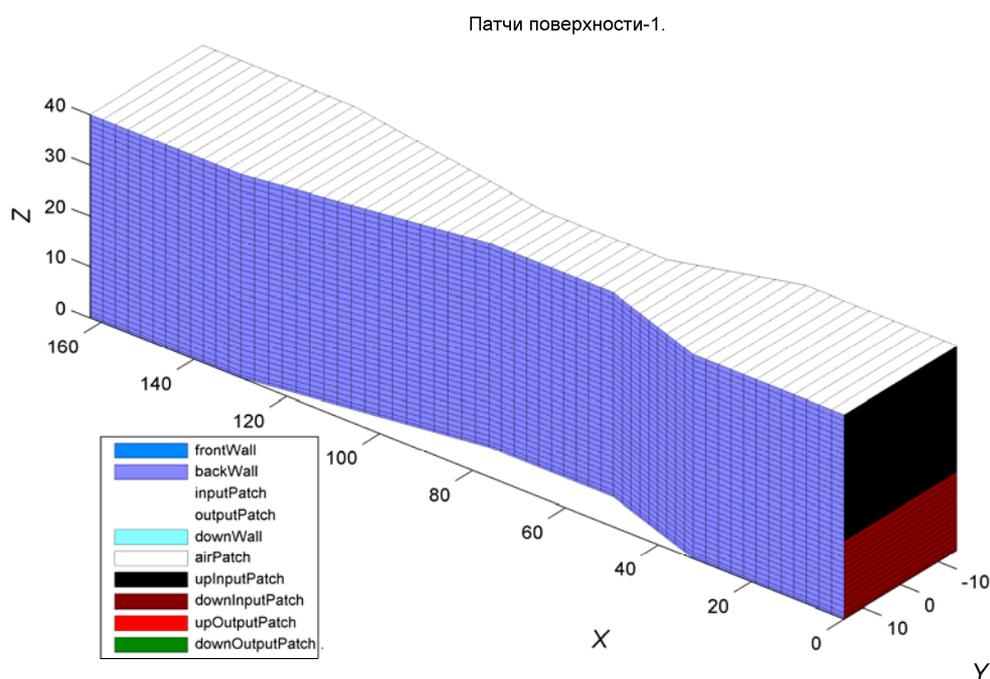


Рисунок 2 - График домена с внешними патчами, на которых заданы граничные условия для расчета гидравлики потока в гидрометрическом лотке при заданном уровне верхнего бьефа

На рисунке 3 представлены результаты упрощенного контрольного расчета на прореженной сетке трехмерного поля скоростей и уровня свободной поверхности без учета донной шероховатости. На графике - продольное осевое сечение в области сопряжения подводящего канала с горловиной (граничное условие на стенках – скорость=0)

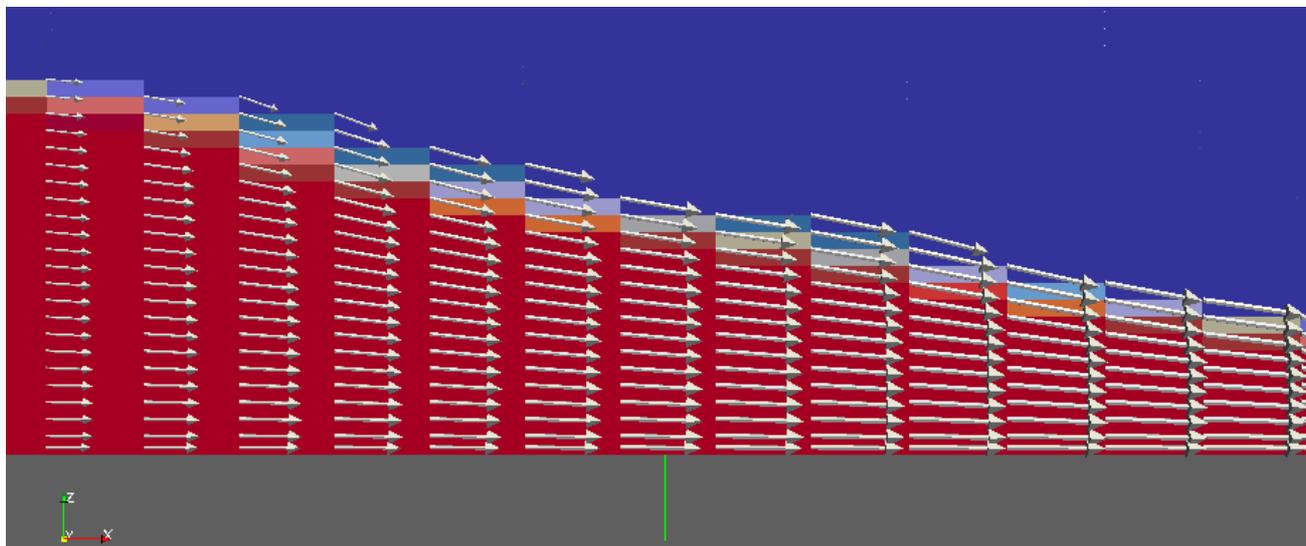


Рисунок 3 - График векторного поля скоростей и свободная поверхность потока при нулевой шероховатости на русла в осевом сечении лотка критической глубины в области входа в горловину

Список использованных источников

1. Кушер А.М. Расчет и выбор конструкции гидрометрического лотка на каналах водохозяйственных систем. Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения», часть 4 «Водные объекты: состояние, проблемы и пути их решения», МГУП, М., 2011, с. 176-183.
2. OpenFoam. Programmer's Guide. Version 2.1.1

УДК 631.6

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ БЕРЕГОВ НА ПРЕДГОРНЫХ УЧАСТКАХ РЕК

С.С. Медведев¹, Б.И. Изиев²

¹ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Москва, Россия;

²«Даггипроводхоз», г. Махачкала, Россия

На предгорных участках рек их берега подвергаются интенсивному размыву под воздействием руслового потока, обладающего значительными скоростями. Весь многолетний опыт проведения руслорегулирующих и берегозащитных работ с неоправданно широким использованием жестких бетонных элементов показывает их ненадежность в эксплуатации и не позво-

ляет получить положительные результаты по причине их частых разрушений и аварий. Основная ошибка заключается в том, что конструктивное решение защиты берега должно строиться не на противодействии проектируемых сооружений энергии потока воды, а на принципах органичного сосуществования с ним и сопровождающими его динамическими русловыми процессами.

Известные в практике берегозащитные конструкции (закрепление береговой линии путем укладки ж\б плит, монтажа ж\б свай-оболочек, отсыпка каменно-набросных шпор примыкающих к размываемому берегу, защита крупными массивами и др.) создают дополнительные локальные очаги активного размыва прилегающего к нему грунта, так как из-за своей жесткости служат гасителями огромной энергии потока, с изменением структуры потока в турбулентную, с последующим преобразованием энергии потока в энергию размыва грунта, слагающего речное русло. В отличие от жестких сооружений, берегозащитные конструкции из коробчатых габионов обладая характеристиками близкими к естественному руслу реки (шероховатость, фракционный состав отмошки русла и др.) наиболее приемлемы в практике берегозащитного строительства. При всех плюсах, габионные конструкции обладают одним существенным недостатком. Цинковое покрытие проволоки габионов при контакте с влекомыми гравийными наносами (галечник, булыга), перемещающимися вдоль защитного покрытия, подвержено активному истиранию в результате чего сетка рвётся и габионная конструкция разрушается и теряет свои защитные функции.

Для защиты оцинкованной сетки габионов от истирания нами предлагается исключить контакт сетки с влекомыми наносами за счет установки по всей длине участка перед габионами со стороны реки сквозных тетраэдров, выполненных из ж\б балок и объединенных между собой в единую систему в вершинах оснований соединительными кольцами из арматуры $d=10\text{мм}$.

Принципиальные схемы предлагаемого способа защиты габионными конструкциями берегов на предгорных участках рек даны на рисунках 1 и 2.

Приведенные способы защиты заключаются в следующем:

На закрепляемом участке реки по всей длине участка крепления на расстоянии от 3-5 м от нижнего края габионного крепления укладываются анкеры из ж\б балок длиной $L=1.8\text{м}$, сечением $15\times 15\text{ см}$, которые крепятся между собой кольцами из арматуры диаметра 10 мм . Высотой анкеры располагаются на 15 см ниже отметки нижнего края габионного крепления. К каждому узлу крепления анкеров между собой (через $1,9\text{ м}$ по длине) приваривается тяж анкера тетраэдров из катанки $d=8\text{мм}$ с выводом его за нижний край габионного крепления на 15 см ниже нижнего края габионного крепления (смотри узел А на рисунках). При этом отметка нижнего края габионного крепления не должна превышать $1,5\text{ м}$ от отметки расчетного максимального размыва реки и располагаться ниже минимальной отметки русла реки при паводках. Выполняется качественная насыпь над анкерами под профиль габионного крепления. На поверхности укрепляемой габионными конструкциями (габионы или матрацы «Рено») устраивается защитный слой грунта

t=10 см из мягкого минерального грунта. По защитному слою грунта раскладывается геотекстиль - Geolon Pet200. Геотекстиль расстилается с нахлестом друг на друга не менее 30 см по всей поверхности контакта габионов с грунтом. Монтируются габионные конструкции в соответствии с существующей технологией монтажа.

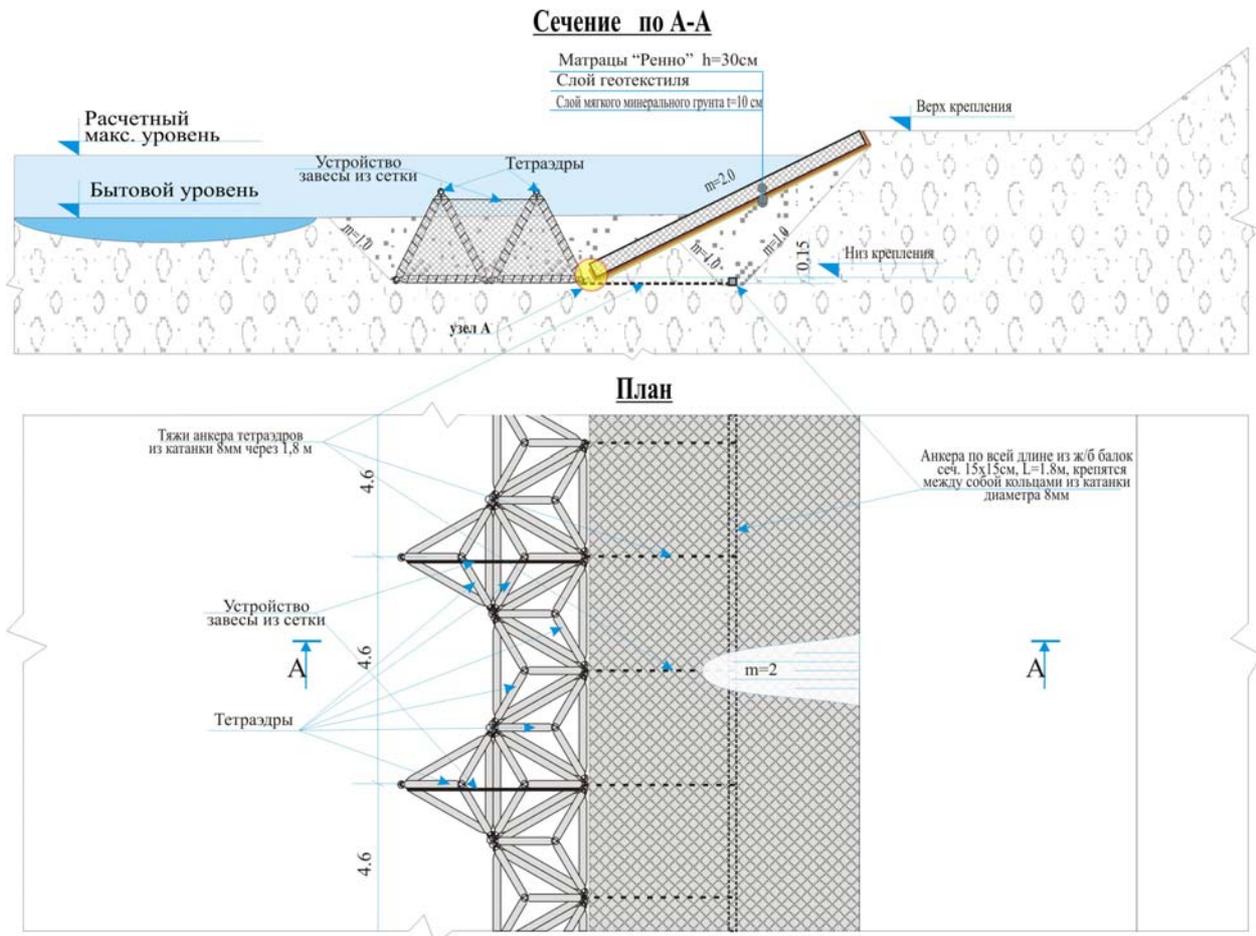


Рисунок 1 - Схема крепления берега матрацами "Рено"

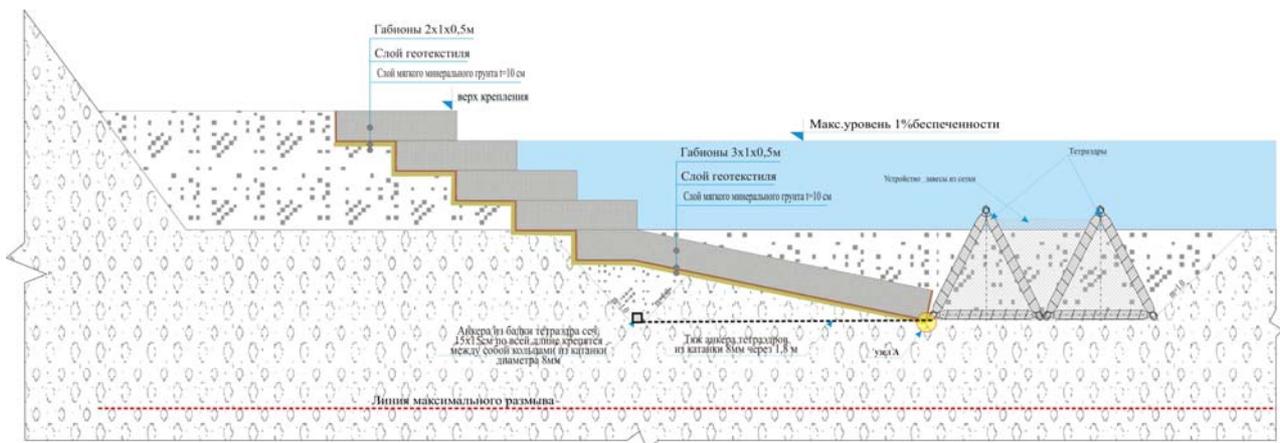


Рисунок 2 - Схема сечения крепления габионами "Джамбо"

Выполняется сборка тетраэдров, каждая из которых состоит из 6-ти

ж/б балок длиной $L=1,8$ м, сечением 15×15 см каждый, с объединением их в вершинах соединительными кольцами из арматуры $d=10$ мм. Тетраэдры устанавливаются в один ряд по ширине на всю длину укрепляемого участка. Со стороны реки через 4.6 м по длине участка крепления, дополнительно устанавливается второй ряд тетраэдров. Все тетраэдры объединяются между собой в единую систему в вершинах оснований соединительными кольцами из арматуры $d=10$ мм. Узлы оснований тетраэдров, прилегающих к габионам, крепятся к ранее уложенным тязам из катанки, которые в свою очередь прикреплены к анкерам из ж/б столбиков уложенных в насыпи оснований габионов. Через 4.6 м вдоль линии крепления, между тетраэдрами, перпендикулярно направлению потока, устраиваются сетчатые завесы из габионной сетки, закрепляемые к тетраэдрам катанкой. Их назначение – задержка влекомых наносов и плавника. Над смонтированными тетраэдрами выполняется засыпка из грунта русла реки по ранее существующему рельефу, но не менее $2/3$ высоты тетраэдра.

Предлагаемый способ защиты берега применен на ряде объектов берегозащиты на р. Самур. Ниже на фото (рис.3) приведен пример его реализации на участке перехода магистрального газопровода «Моздок-Казимагомед» через реку Самур.



Рисунок 3 - Защита берега на участке перехода магистрального газопровода "Моздок-Казимагомед" через реку Самур

ВЫВОДЫ:

1. Существующие способы защиты берега от размыва на предгорных участках рек материалоемки, дорогостоящи и не обеспечивают надёжной защиты берегов от размыва, что в конечном итоге отражается на безопасности речных сооружений и близлежащих коммуникаций.

2. Изложенный выше способ обеспечивает более надёжную защиту береговой линии от воздействия руслового потока и способствует отложению влекомых наносов вдоль защищаемого участка берега.

3. Предлагаемый способ заключается в укладке габионов или матов Рено на размываемый берег и создании в прибрежной зоне русла зоны повышенной шероховатости путём создания гибкой системы тетраэдров из ж/б

свай.

4. Способ был успешно применён для защиты берегов на р. Самур в Магарамкенском и Сулейман Стальском районах Республики Дагестан на участках:

- Перехода магистрального газопровода «Моздок-Казимагомед»;
- Входного оголовка акведука на узле ГТС Самур-Дербентского канала;
- Укрепительных работ Автодороги «Касумкент - Шихикент».

Список использованных источников

1. Медведев С.С., Изиев Б.И., Дзиев К.М., Иванов И.С. Способ защиты берегов рек на предгорных участках рек. Заявка на изобретение №2012153935/13(085688) от 14.12.2012г.

2. Медведев С.С. Оценка безопасности состояния подводных магистральных трубопроводов. //Ж. «Газовая промышленность» №4, 2006.

3. Медведев С.С. Методы расчётов размыва дна взвесенесущим русловым потоком. //Ж. «Газовая промышленность», №2, 2006.

4. Медведев С.С. Исследование русловых процессов р.Оби на участке технического коридора подводных переходов газопроводов. //Труды Академии проблем водохозяйственных наук. Вып.7 «Русловедение и гидроэкология». М.: 2002.

5. Медведев С.С., Салюков В.В., Лебедев Н.В., Долгов И.А., Ермолаев С.А. Научно-техническое обеспечение гидротехнической защиты подводных переходов трубопроводов. //Ж. «Газовая промышленность» №12, 2004.

6. Изиев Б.И., Токаев В.З. Противозрозионные работы на подводных переходах МГ ООО «Каспийгазпром». //Ж. «Газовая промышленность» №12, 2004.

УДК. 626.823

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДОПОДВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Ш.Р. Рустамов, Р.Р. Эргашев, Н.Р. Насырова
НИИИВП при ТИИМ, г. Ташкент, Узбекистан

Опыт эксплуатации центробежных насосов, которые составляют до 90% ирригационных насосов, обусловил необходимость научного обоснования и экспериментальной проверки эффективности их работы при перекачивании воды с высоким содержанием плавника и наносов, что приводит к интенсивному кавитационно-абразивному износу их деталей, связанного с высокими эксплуатационными затратами на насосных станциях (НС). Вопросы модернизации особенно важны для тех систем, которые подвергаются быстрым техническим изменениям или где эффективность новых капиталовложений больше. Однако на сегодняшний день количественная оценка эффективности замены насосных агрегатов (НА) возможна только при полном износе оборудования.

Вопросами повышения эффективности эксплуатации НС занимались многие исследователи, среди которых отдельно можно подчеркнуть работы

ученых ВНИИГиМ, МЭИ, МГМИ, МИСИ, САНИИРИ - Виссарионова В.И., Гловацкого О.Я., Карелина В.Я., Некрасова В.М., Рахимова Ш.Х. и др.

Для предотвращения заиливания водоприемного сооружения предложена новая конструкция всасывающей трубы центробежного НА, которая снабжена дополнительным устройством, позволяющим предотвратить оседание наносов на дне аванкамеры (рис.1).

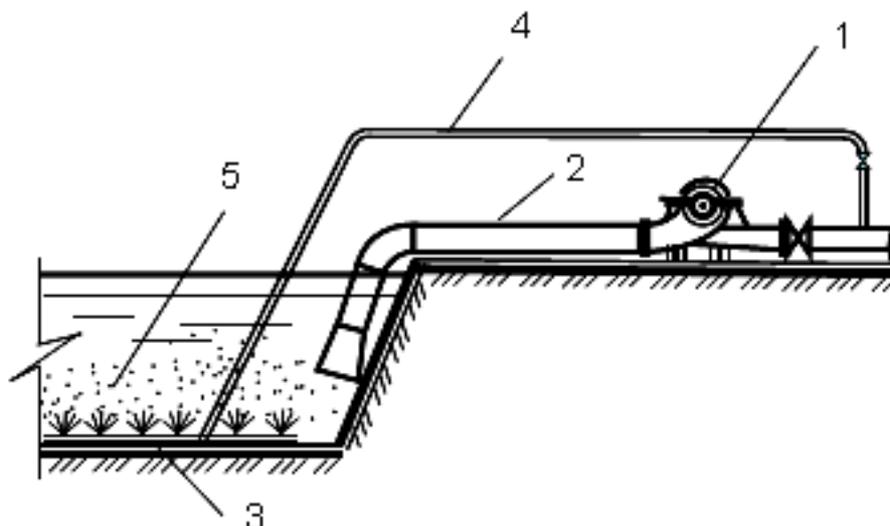


Рисунок 1 - Новая конструкция водоприемного сооружения

Дополнительное устройство представляет собой напорную подводную трубу 4, которая соединяется с одной стороны с нагнетательным трубопроводом НА 1, а её другая сторона имеет специальное приспособление 3 в виде кольцевых перфорированных труб, проложенных по откосам или дну аванкамеры в тех местах, где оседают наносы [1]. За счет гидродинамического давления вода вытекает из отверстий труб струей, и это обстоятельство создаёт в среде пульсационное движение потока, не позволяющее частицам оседать. Таким образом, поток перед агрегатами всегда имеет турбулентный, беспокойный характер, а наносы 5 находятся во взвешенном состоянии и вместе с водой через всасывающую трубу 2 перекачиваются в верхний бьеф.

Для определения влияния характеристик системы подачи воды была проведена серия экспериментов по выявлению зависимости ω_0/ω_{om} от H/d и $q/Q_{НС}$ (ω_0 – площадь аванкамеры, не подвергшаяся заилению под действием устройства, ω_{om} – площадь аванкамеры, занятой отложениями наносов без применения устройства, H – напор воды в перфорированной трубе, d – диаметр отверстия в перфорированной трубе, q – величина подачи воды в перфорированную трубу, $Q_{НС}$ – подача насосной станции).

Для определения аналитической зависимости между параметрами H/d и $q/Q_{НС}$, которая могла бы аппроксимировать исследуемый процесс, экспериментальные данные, полученные при измерениях величин $\omega_0/\omega_{om} = \bar{\omega}$, $H/d = \bar{H}$, $q/Q_{НС} = \bar{q}$, были подвергнуты обработке и дисперсионному анализу,

в результате чего получено следующее уравнение

$$\bar{\omega} = 3,22 \cdot \bar{q} \cdot \bar{H}^{0,4} \quad (1)$$

Достоверность экспериментальных точек и адекватность полученного уравнения проверены критериями Фишера и Кохрана и получены удовлетворительные результаты, что свидетельствует о правомочности уравнения (1) для описания действия устройства с параметрами \bar{H} и \bar{q} .

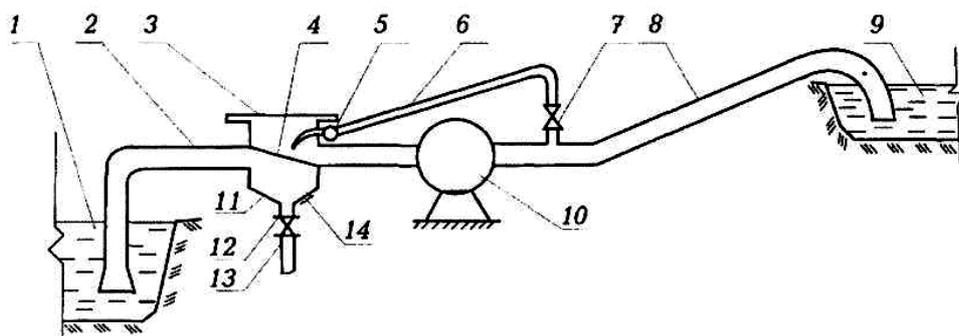
Результаты наблюдений показывают, что почти во всех случаях повышенной заиляемости водоприемных сооружений в тяжелые условия попадают крайние агрегаты по водозаборному фронту. В таких случаях предложено устраивать регулируемую всасывающую трубу [1]. Эта труба отличается тем, что её колено выполнено гибким, а восходящая часть имеет телескопическую конструкцию. Такая конструкция позволяет изменить местоположение оголовка по высоте, оставив допустимое расстояние $0,4 \cdot D_{\text{вх}}$ над отложениями. На наш взгляд, установка таких регулируемых всасывающих труб для крайних агрегатов позволяет обеспечить работу НС в соответствии с графиком даже при невозможности очистки аванкамеры.

Для защиты насосов от плавающего мусора, а также от наносов с крупными абразивными частицами авторами предложено новое комбинированное сорозащитное устройство [2]. Полезная модель поясняется чертежом (рис. 2, фиг. 1). В поверхностный источник 1 опущена всасывающая труба 2, на которой установлено сорозащитное устройство 3 с внутренней решеткой 4. Над решеткой расположено гидравлическое промывное устройство 5, соединенное через трубопровод 6 и задвижку 7 с напорным трубопроводом 8, который выходит в напорный бассейн 9. Насос 10 смонтирован за сорозащитным устройством 3. Дно камеры 11 выполнено наклонным и соединяющимся со сбросным трубопроводом 12, на котором установлена задвижка 13, причём в днище предусмотрен люк с герметической крышкой 14.

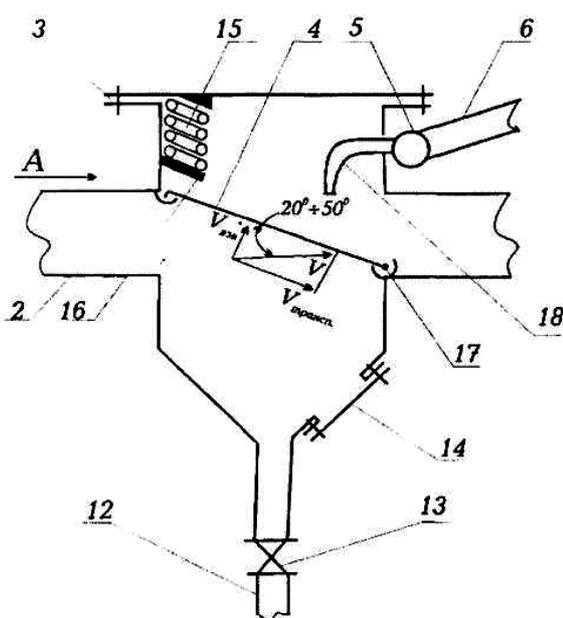
На рисунке 2 (фиг. 2) показана возвратная пружина 15 с концевым контактным устройством 16. Нижний конец решетки выполнен шарнирным 17, над ним расположены сопла 18 промывного устройства 5. На рисунке 2 (фиг. 3) показаны сопла 18. Засоренная вода из поверхностного источника 1 по всасывающей трубе 2 поступает в сорозащитное устройство 3 (по стрелке «А»). Плавающий и взвешенный мусор, находящийся в воде, транспортируется потоком вдоль решетки 4, расположенной под $\alpha = 20 \div 50^\circ$ к водотоку, и перемещается в её нижнюю часть. Намокший и набухший мусор тонет и скапливается внизу камеры, а частично застревает между стержнями в нижней части решетки 4. По мере забивания решетки 4 начинает расти взвешивающая V взв. составляющая скорости гидродинамических сил (см. разложение вектора V) и скоростной напор, соответственно сжатие струи (просветы между стержнями решетки 4). Промывная вода через сопла 18 смывает мусор с решетки, который вместе с выпавшим осадком уходит в сброс. В случае попадания в камеру крупных предметов предусмотрено их удаление через нижний люк 14. Выполнение верхнего конца решетки 4 не закрепленным жестко к камере приводит к вибрации стержней за счёт тур-

булентных завихрений при обтекании их потоком, что облегчает процесс перемещения сора к сбросу. Монтаж решетки в камере, а не в самой всасывающей трубе позволяет за счёт разницы скорости осаждать крупные взвешенные абразивные частицы, то есть создавать комбинированный эффект отстаивания и промывку наносов.

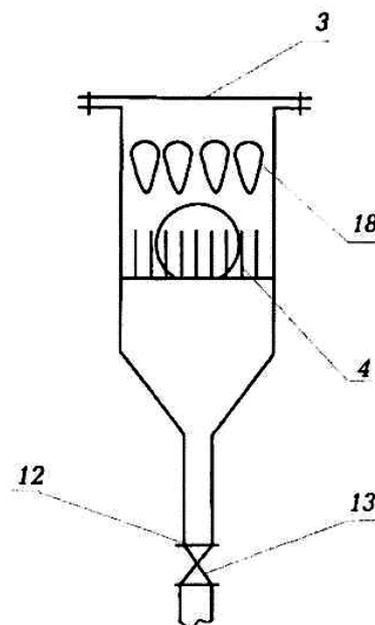
Применение решетки с шарнирным креплением позволит полностью автоматизировать процесс очистки воды от мусора и наносов без установки дополнительных приборов, измеряющих перепад уровней: дифференциальных манометров и т.д., причем очистка автоматически заканчивается после удаления осадка во время работы основного НА.



Фиг 1.



Фиг 2.



Фиг 3.

Рисунок 2 - Сорозащитное устройство с внутренней решеткой

Расположение решетки под острым углом $20 \div 50^\circ$, определенным при

лабораторных исследованиях, не только позволяет использовать энергию потока по 2-м направлениям: V трансп. – для очистки решетки самим водотоком, V взв. – для возможности автоматического начала и конца очистки в оптимальное время, но и даёт рациональное, компактное решение всего устройства, с целью защиты насоса от механических повреждений и износа трущихся поверхностей абразивными частицами (твердость по Моосу >5).

При водозаборах из открытых источников применение новых водоприёмных камер даёт значительную экономию капиталовложений и времени, и намного облегчает и удешевляет эксплуатацию.

Список использованных источников

1. Мухаммадиев М.М., Носиров Ф.Ж., Уришев Б.У. Повышение эффективности работы водоприёмных устройств насосных станций // Гидротехническое строительство. - Москва, - 2010. - №1. – С.11-13.

2. Гловацкий О.Я., Эргашев Р.Р. Сорозащитное устройство водозаборного сооружения // Патент Республики Узбекистан UZ FAP 00528, Бюл.№3, 2010.

УДК 627.15

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО СТОКА НА ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ

А.О. Щербаков, С.С. Медведев

ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Москва, Россия

В настоящее время значительная часть гидромелиоративных систем пришла в упадок и требует существенной реконструкции и проведения ремонтно-восстановительных работ. Большинство водохранилищ и каналов оросительных систем ввиду отсутствия надлежащей эксплуатации заилились и не выполняют предназначенных для них функций. В тоже время для обеспечения надёжной эксплуатации гидромелиоративных систем требуется разработка новых подходов к регулированию жидкого и твёрдого стока как при водозаборе из рек в оросительные каналы, так и в системе самих каналов оросительной сети.

Разработка гидромелиоративных систем нового поколения, включающих достижения науки и техники последних лет, требуют особого внимания к решению вопросов обеспечения надёжности их работы в эксплуатационном режиме.

Одним из основных факторов, влияющих на надёжность работы мелиоративной системы, является поступление в неё части твёрдого стока реки-источника орошения. В условиях многофункциональной работы мелиоративной системы, связанной с графиком распределения жидкого стока по элементам оросительной сети и его изменениями в течение годового эксплуатационного цикла, рациональное распределение поступающего в водозабор твёрдого стока по элементам системы орошения в увязке с жидким стоком имеет определяющее значение в обеспечении надёжной работы всей

мелиоративной системы.

При проектировании новых и реконструкции действующих оросительных систем регулированию твёрдого стока и руслоформирующим процессам в гидротехнических элементах оросительной сети не оказывается должного внимания, что создаёт серьёзные проблемы для эксплуатационных организаций в процессе работы оросительных систем.

К таким проблемам относятся:

- деформации русла реки ниже водозабора из неё в магистральный канал, связанные с увеличением концентрации наносов в русловом потоке и изменением транспортирующей способности;

- заиление магистрального канала и развитие плановых деформаций его русла при избыточном поступлении твёрдого стока из реки в водозабор;

- размыв русла магистрального канала при дефиците твёрдого стока, поступающего в него из реки;

- заиление элементов распределительной сети, включая лотки, напорные и безнапорные водоводы, при избыточном поступлении в них твёрдого стока из магистрального канала;

- размыв русел распределительных каналов при дефиците мутности потока, поступающего в них из магистрального канала;

- разрушение кольматирующего слоя на размываемых участках русел и, как следствие, увеличение потерь воды на фильтрацию и необлицованных каналов;

- ряд других негативных факторов, обусловленных нерациональным делением твёрдого стока по элементам оросительной сети.

До настоящего времени не разработаны принципиальные технологические схемы комплекса гидротехнических сооружений гидромелиоративных систем при плотинном и бесплотинном водозаборе, включающие компоновку водозаборных узлов и рациональные схемы регулирования жидкого и твёрдого стока, обеспечивающие техническую и экологическую безопасность системы «водоисточник - гидромелиоративная система - водоприёмник».

В данной статье рассматривается способ регулирования твёрдого стока с применением прирусловых отстойников нового поколения с механизированной очисткой от наносных отложений и с регулируемой длиной осаждения разнофракционных наносов. До настоящего времени конструкции таких отстойников и методы их расчёта не разработаны. Основным принципом работы таких отстойников заключается в осаждении в них не транспортируемых в магистральном канале фракций наносов, для каждой из которых устанавливается своя длина осаждения, которая обеспечивается регулированием рабочей длины многосекционного отстойника. Особенно это важно при промывке верхнего бьефа наносоаккумулирующих водохранилищ с целью недопущения в реку ниже водозаборного узла не транспортируемых в реке фракций наносов. В статье рассматриваются также вопросы переноса и осаждения наносов различной крупности во взвешенном потоке.

Система регулирования при бесплотинном водозаборе

Бесплотинный водозаборный узел (рис. 1) включает следующие элементы:

- река - источник орошения;
- поверхностная струенаправляющая система М.В. Потапова (её расчёт и методика эксплуатации широко освещены в трудах М.В. Потапова, А.Г. Хачатряна, Х.Ш. Шапиро [1] и в данной работе не рассматриваются);
- подводящие каналы – отстойники;
- шлюз - регулятор стока. Конструктивное решение и размеры плотины принимаются в зависимости от объёмов забираемой в оросительную сеть воды и принятой системы осаждения не транспортируемых в магистральном канале наносов;

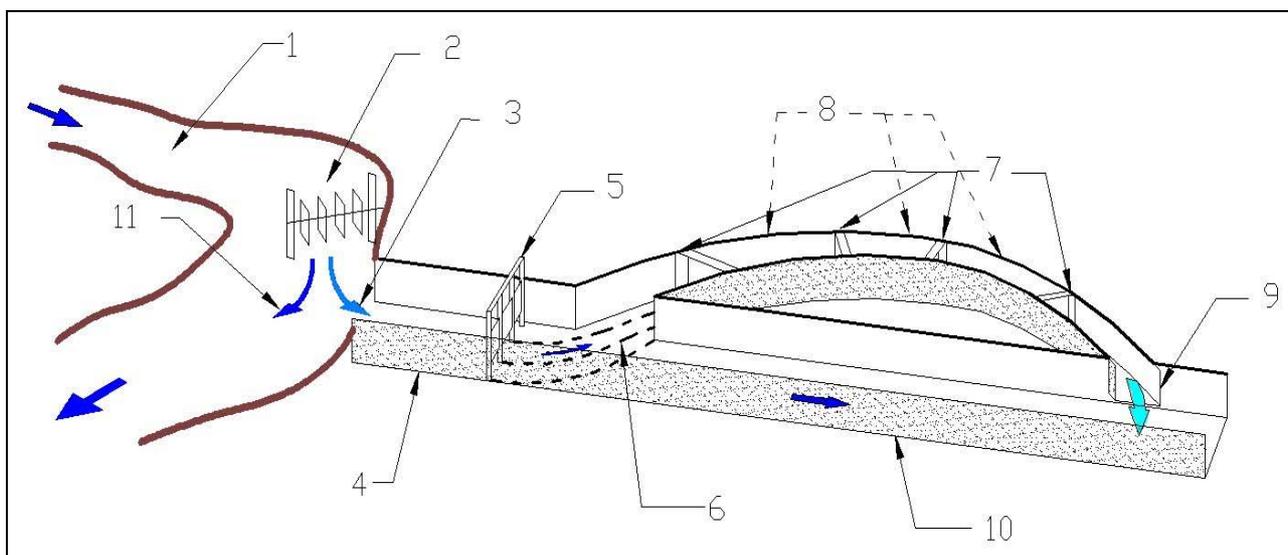


Рисунок 1 - Схема регулирования твердого стока при бесплотинном водозаборе:

1-река; 2-струенаправляющая установка системы М.В. Потапова; 3-поверхностные слои взвесенесущего потока; 4-головной отстойник; 5-шлюз-регулятор жидкого и твердого стока; 6-подводящие к отстойнику донные галереи; 7-донные переливные пороги с регулирующими щитами; 8-последовательно соединенные секции отстойника с регулируемой длиной осаждения разнофракционных наносов; 9-сбросной канал из отстойника с консольным водосбросом в конце; 10-магистральный канал; 11- придонные слои взвесенесущего потока

- прирусловой отстойник с механизированной очисткой и регулируемой длиной осаждения разнофракционных наносов (рис. 2). Конструкция отстойника, методика его расчёта и принцип работы рассмотрены ниже;

- магистральный канал. Методика расчёта параметров его динамически устойчивого русла и допустимых характеристик концентрации наносов различных фракций, соответствующих транспортирующей способности потока в канале, рассмотрены в работе С.С. Медведева [3];

- регуляторы стока при водозаборе в распределительные каналы;
- сеть распределительных каналов.

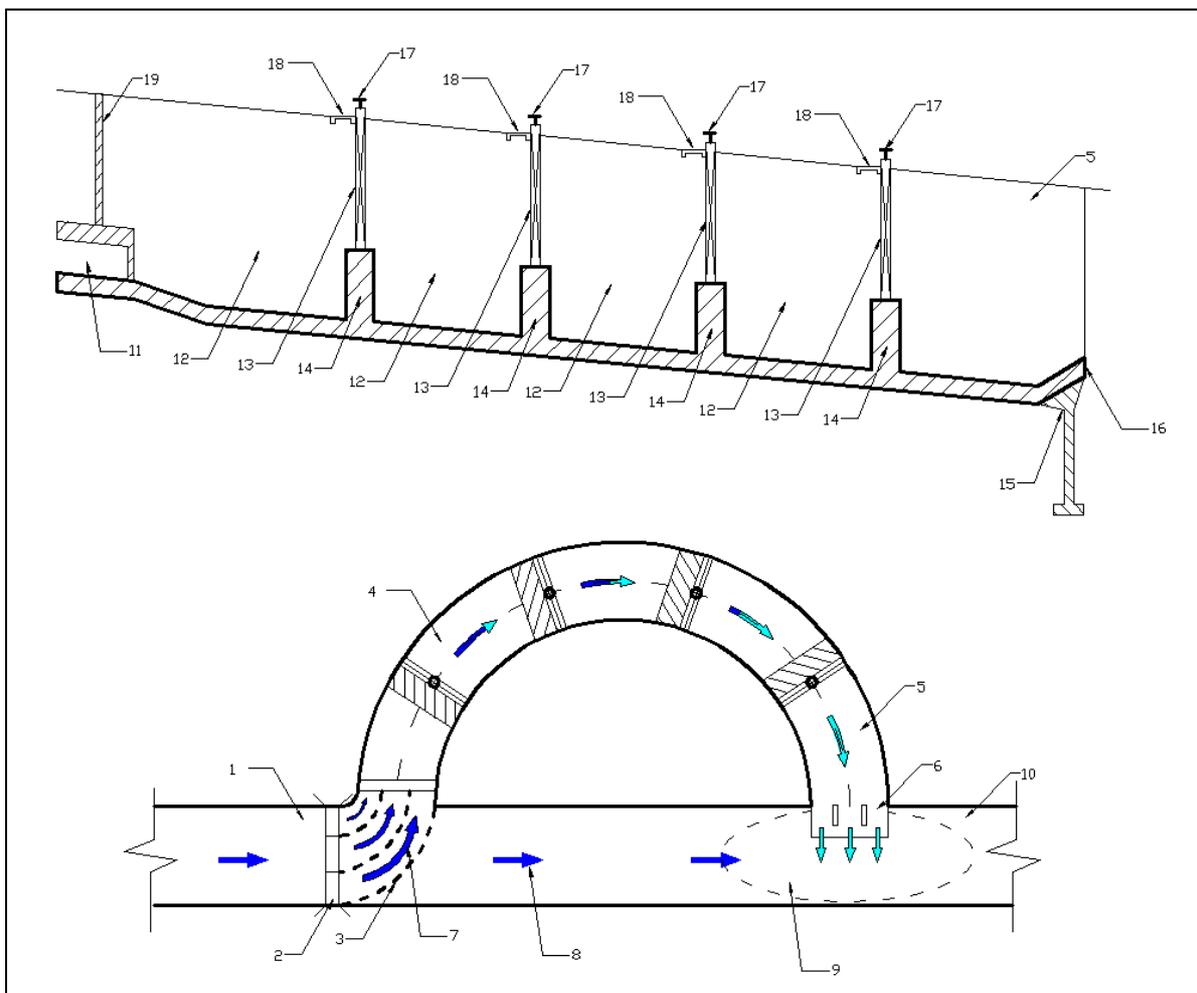


Рисунок 2 - Прирусловой отстойник с механизированной очисткой от наносов и регулируемой длиной:

1-головной отстойник; 2-шлюз-регулятор жидкого и твердого стока; 3-донные переливные пороги; 4-прирусловой отстойник; 5-сбросной канал из отстойника; 6-консольный водосброс; 7-придонные слои потока; 8-поверхностные слои потока; 9-зона перемешивания осветленного в отстойнике и взвесенесущего потока; 10-магистральный канал; 11-вход в отстойник; 12-наносоаккумулирующие секции; 13-переливные стенки; 14-щиты разделяющие секции отстойника; 15-опора консоли; 16-консольный водосброс; 17-механизм подъема щитов; 18-пешеходные мостики; 19-раздельная стенка на входе в отстойник

Регулирование твёрдого стока по предлагаемой технологии осуществляется следующим образом:

В русле реки - источнике орошения 1 монтируется поверхностная струенаправляющая система М.В. Потапова 2, создающая поперечную циркуляцию речного потока и расслаивающая его по глубине. При этом придонные слои 11, транспортирующие крупные фракции речных наносов, отклоняются от водозабора в речной поток, а поверхностные 3 с более мелкими наносами направляются в подводящий канал – головной отстойник 4, в котором осаждается большая часть донных и взвешенных наносов, поступающих из реки 1.

В дальнейшем осуществляется третий этап регулирования твёрдого

стока путём расслоения взвесенесущего потока по глубине на входе в магистральный канал 10 при помощи шлюза - регулятора 5, устанавливаемого в конце подводящего канала - отстойника 4, при этом придонные слои потока 6 с не транспортируемыми потоком в канале 10 наносами направляют через донные промывные галереи 3 и коллектор коробчатого типа 8 в прирусловой отстойник 4 с механизированной очисткой отложений и регулируемой длиной осаждения разнофракционных наносов. Верхние (поверхностные) слои потока, мутность которых в отношении отдельных фракций наносов не превышает величину транспортирующей способности потока в магистральном канале 10 в отношении этих фракций.

Применение данного комплекса сооружений позволяет защитить каналы оросительной системы и русло реки ниже водозабора от неблагоприятных деформаций (от заиления и размыва).

Осаждение наносов различной крупности в реках и каналах

В данном разделе представлены некоторые результаты лабораторных исследований переноса и осаждения взвеси, выполненных в гидротехнической лаборатории ВНИИГиМ на гидравлическом лотке с переменным уклоном [4].

Эксперименты проводились с использованием имитаторов речных наносов – мелких частиц бисерполистирола различной гидравлической крупности. Частицы подбирались таким образом, чтобы охватить широкий спектр наносов с динамической крупностью $W^*=W/U^*$ от 0 до 1,2 (W - гидравлическая крупность наносов, U^* - динамическая скорость потока). В процессе проведения лабораторных исследований посредством импульсной фотосъемки были получены треки частиц с координатной привязкой их положения относительно глубины потока. Всего было обработано 2500 протяженных траекторий длиной до 12 глубин потока (лагранжев эксперимент) и более 6000 коротких траекторий (эйлеров эксперимент).

На рисунках 3-6 представлены экспериментальные и расчетные данные по переносу и осаждению наносов различных фракций в открытом потоке.

Результаты экспериментов по распространению от источника потока частиц различной крупности для условий плоской задачи: скорости осаждения, значения величины дисперсии частиц в вертикальной плоскости как функции расстояния от источника, коэффициентов вертикальной диффузии частиц, формы распределения частиц по глубине потока, значения координат фронтов факела мутности в различных створах - послужили основой для составления методики расчета распространения мутности для условий полного отражения частиц от дна. Учет отложения наносов после контакта потока наносов с дном производится на основе результатов экспериментальных [6]

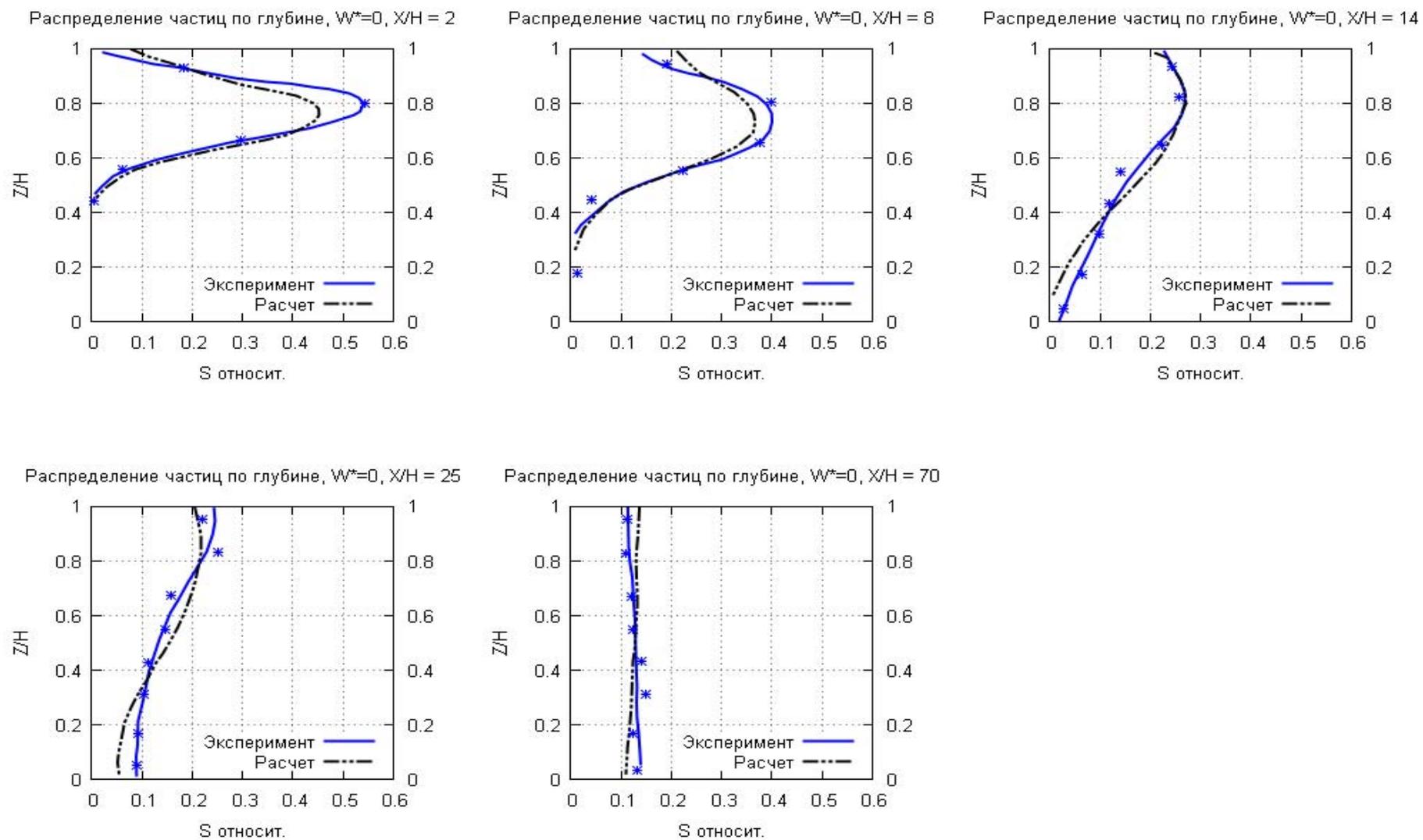


Рисунок 3 - Распределение частиц наносов по глубине потока при удалении от источника взвеси ($W^*=0$)

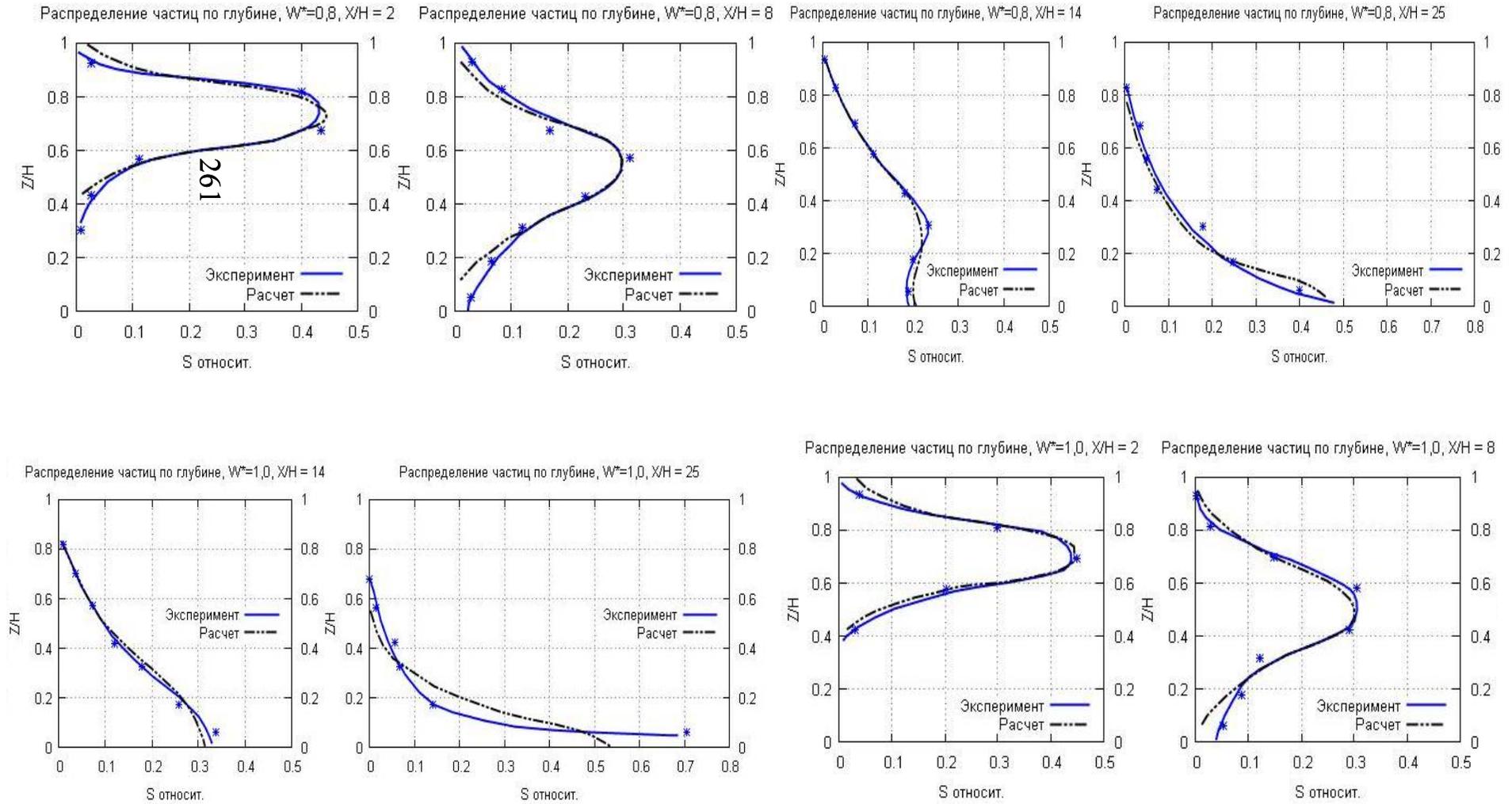


Рисунок 4 - Распределение частиц наносов различной крупности по глубине потока при удалении от источника взвеси ($W^*=0,8; 1,0$)

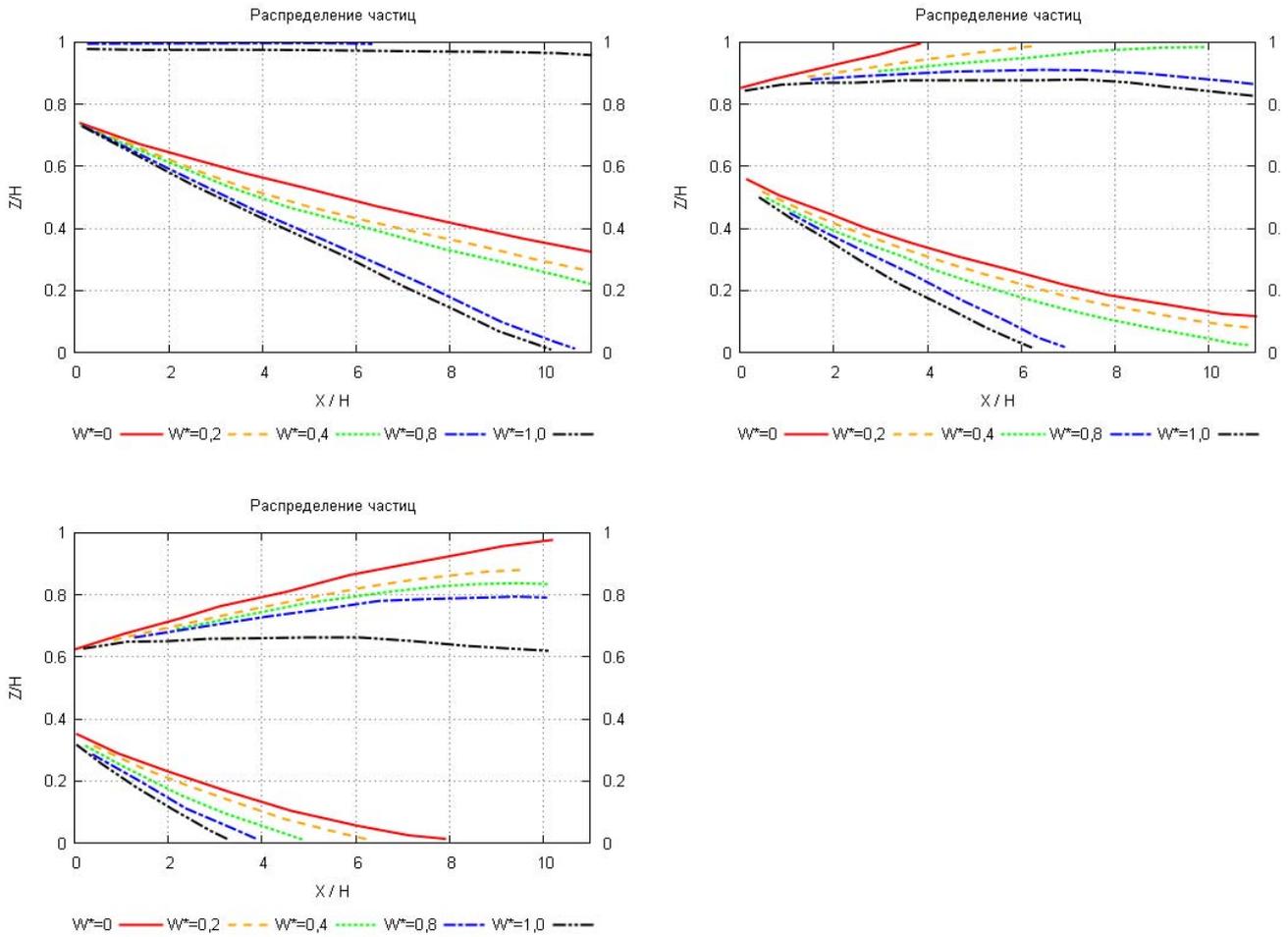


Рисунок 5 - Положение «фронтов» концентрации частиц различной крупности при выпуске взвеси с различного уровня

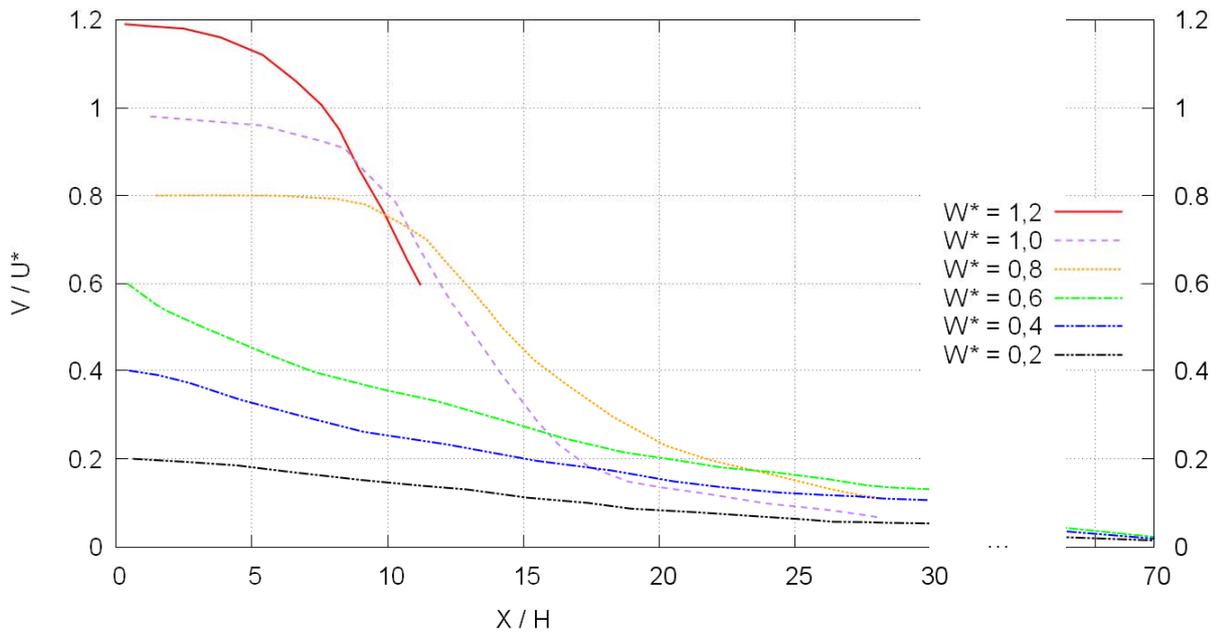


Рисунок 6 - Экспериментальные данные осаждения частиц различной крупности при удалении от источника

исследований [7], обработанных и проанализированных в работе [5], а также некоторых дополнительных предположений. На основе положений диффузионной теории и экспериментальных данных был разработан аналитический метод, который позволяет рассчитывать параметры многокамерных отстойников, концентрацию взвеси в заданной точке потока отдельно для каждой фракции наносов, а также мощность отложений наносов различной крупности в реках и каналах при поступлении в них избыточной мутности.

Положение створа начала осаждения (заиления) $X_{нач}$ для частиц наносов с $W_* < 0,4$ определяется по экспериментальной формуле:

$$X_{нач} = \frac{Z_{вып}}{0,8U_* + W_i} U$$

Положение створа максимального заиления $X_{макс}$ для частиц $W_* \geq 0,4$ определяется как:

$$X_{макс} = \frac{Z_{вып}}{W_i} U \text{ при } 0,4 \leq W_* \leq 0,8$$

$$X_{макс} = \frac{Z_{вып}}{0,9W_i} U \text{ при } 0,8 < W_* \leq 1,2$$

Z – вертикальная координата места поступления взвеси в поток;

$W_* = W/U_*$ - динамическая крупность наносов.

Список использованных источников

1. Медведев С.С. Лебедев Н.В., Фирсов А.В. «Регулирование жидкого и твёрдого стока в реке в районе водозабора». // Материалы международной конференции «Экологические проблемы мелиорации» М.: ВНИИГиМ, 2002.
2. Медведев С.С. Рациональное распределение твёрдого и жидкого стоков в элементах оросительной сети. //Ж. Вестник Россельхозакадемии, №3, 2006.
3. Шапиро Х.Ш. Регулирование твёрдого стока при водозаборе в оросительные системы. -М.: Колос,1983.
4. Щербаков А.О. Автореферат дисс. на соискание степени канд. техн. наук, М.,1989.
5. Вербицкий В.С., Кашин В.С. Кинематическая модель движения наносов. - Тр. 5 Всесоюзного гидролог. съезда.- Л.: Гидрометеиздат. т. 10. 1988.- с.12-22.
6. Щербаков А.О., Ермаков Г.Г. Метод пофракционного расчета распределения наносов в русловом потоке. //Мелиорация и водное хозяйство, М., №5, 2014.
7. Jobson H.E., Sayre W.W. Vertical transfer in open channel flow. Proc. of ASCE. Jour. of Hydr. Div. Vol. 96. No 3. 1970 - p.p. 703-724.

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ МЕЛИОРАТИВНЫХ РАБОТ

УДК 631.6

ПРИМЕНЕНИЕ КАНАЛООЧИСТИТЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ДНА КАНАЛОВ ОСУШИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Х.А. Абдулмажидов, Н.К. Теловов

ФГБОУ ВПО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, Г. Москва, Россия

В настоящее время в Российской Федерации отрасль по выпуску каналоочистительных машин функционирует слабо, если не сказать о полном ее отсутствии. Зачастую очистка тех немногих осушительных каналов, где очистка все еще проводится, да и оросительных сводится лишь к применению для очистных работ стандартных одноковшовых экскаваторов общестроительного назначения. Известно, что одноковшовые экскаваторы не являются машинами специального назначения, и качество очистки ими каналов не отвечает требованиям. При таком положении дел встает вопрос о создании новых каналоочистителей с пассивными и активными рабочими органами или применении модернизированных каналоочистительных машин, прототипы которых были созданы еще в советское время.

Перспективное направление развития технологий по очистке каналов заключается в комплексном использовании каналоочистителей с пассивными и активными рабочими органами. В такие комплексы могут входить машины типа МР-16, МР-7А, ЭМ-202 и ОП после их модернизации. Их сравнительные характеристики (табл. 1), дают представление о границах применения и о технологических возможностях каналоочистителей при обслуживании каналов с характерными естественно-производственными условиями. При очистке каналов приоритетными характеристиками являются не объемы, а качество очистки от наносов с учетом их крайне неравномерного распределения. В основном значительное количество наносов распределяются в устьях каналов, на соединениях одних типов осушительных каналов с другими.

Максимальная производительность каналоочистительных машин достигается при определенной оптимальной толщине слоя наносов. Так, для эффективной работы бокового драглайна, толщина наносов должна быть не менее 0,15 м; для каналоочистителей МР-16 и МР-7А - равной 0,4 м; для ЭМ-202 - не превышать 0,2 м. Кроме того, фрезерные каналоочистители требуют обязательного соответствия ширины очищаемого дна и диаметра фрезы, наличия воды в канале не более 15 см, отсутствия донной растительности. Каналоочиститель ЭМ-202 достигает максимальной производительности, когда его многоковшовый цепной рабочий орган очищает поверхность шириной до 2,0...2,5 м. При очистке дна канала шириной 0,4; 0,6 или

0,8 м производительность резко снижается. Очиститель откосов каналов с пассивным рабочим органом в виде отвала ПО-2 не получил широкого распространения из-за больших боковых тяговых сопротивлений, возникающих при работе машины. Использование бокового отвала приводит к уходу машины в сторону от оси канала, в связи с этим применялись специальные ножи и лыжи для удержания курсового направления.

Таблица 1- Сравнительные характеристики каналоочистителей с различными рабочими органами

Показатели	Марка машины			
	МР-16	МР-7А	ЭМ-202	ПО-2
Максимальная глубина канала, м	3,0	1,9	2,0	3,8
Максимальная ширина канала по верху, м	7,0	4,8	5,0	8,0
Максимальная ширина канала по дну при очистке за один проход, м	0,8	0,7	1,0	-
Максимальная толщина удаляемых наносов при очистке за один проход, см	40	40	20	25
Возможность очистки канала без воды	нет	нет	нет	есть
Максимально допустимый уровень воды в канале, см	20	15	20	20
Возможность очистки каналов с донной растительностью	ограничена	ограничена	ограничена	не ограничена
Возможность очистки каналов с донным креплением	нет	нет	нет	не ограничена
Размещение удаленного грунта	на берме и прилегающей площади			
Пересыпка грунта на откосы канала, %	до 30	до 15	до 5	нет
Подрезание откосов	есть	есть	есть	есть
Необходимость предварительной очистки дна каналов от посторонних предметов	требует предварительной очистки русла			не требует
Максимальные габариты удаляемых из канала предметов, м	0,15	0,15	0,18	0,2
Наличие устройства для обеспечения необходимого уклона дна	нет	нет	нет	нет

Виды эксплуатационных работ на осушительных системах предусматривают выполнение большого количества мероприятий, целью которых является поддержание сети в состоянии высокой эксплуатационной надежности. К примеру, в зоне повышенного увлажнения эффективность работы

мелиоративной системы в большей степени связана с состоянием открытой сети, ее способностью сбрасывать грунтовые и паводковые воды. При этом основное влияние на пропускную способность канала оказывает не только состояние его донной, как считалось ранее, но и состояние придонной части, т.е. прилежащих ко дну откосах. В действительности наносы, заиления и растительность распределены не только по дну. На пропускную способность каналов также влияет соответствие уровня и уклонов дна проектным значениям, извилистость русла, наличие размывов и обрушений, состояние креплений.

Принципиально отличающийся подход к решению проблемы механизированной очистки дна каналов был предпринят Отраслевой лабораторией Московского гидромелиоративного института еще в начале 80-х годов прошлого века. Здесь был создан каналочиститель РР-303 на базе трактора ДТ-75, рабочий орган, которого представляет собой жесткую направляющую балку с перемещающимся вдоль нее прямоугольным ковшом (рис. 1). Балка могла снабжаться дополнительно двумя сменными ковшами различной ширины. Причиной применения ковшей разной ширины (0,4; 0,6 и 0,8 м) явилось их соответствие ширине канала по дну. Очистку более широких каналов по дну планировалось проводить за несколько проходов машины. Для придания очищаемому дну канала требуемого уклона балка была снабжена двумя концевыми опорами с возможностью регулирования высоты. Также предусмотрена возможность изменения толщины снимаемых наносов. Сепарированный ковш позволяет производить очистку дна канала, заполненного водой, без снижения производительности. Ковш также снабжен подвижной стенкой для его принудительной разгрузки. Для соблюдения прямолинейности русла составная стрела каналочистителя снабжена механизмом выноса концевой опоры направляющей балки. Разгружаемые из ковша наносы падают на наклонный желоб, который в свою очередь удаляет их от канала. Каналочиститель может очищать сильно заросшее дно каналов, подрезать и удалять корневую систему растений.

Заложенные при создании данной машины принципы позволили получить при очистке прямолинейную, спланированную поверхность дна, по которому беспрепятственно осуществляется движение потока воды. Следовательно, до минимума сведена вероятность возникновения повторных размывов, отложения наносов, намыва гребней и растительных образований.

Экспериментальные исследования, проведенные на уменьшенной в 2,5 раза модели ковша каналочистителя РР-303 прямоугольного сечения, а также исследования работы ковша натуральной величины на грунтовом канале кафедры «Мелиоративные и строительные машины», выявили некоторые недостатки их работы. Было замечено, что при движении ковша прямолинейно срезается стружка определенной толщины, в то же время происходит подрезание прилежащих ко дну частей наносов, которые в свою очередь в зависимости от их состояния быстро сползают на дно. Это требует дополнительных проходов и снижает производительность машины.

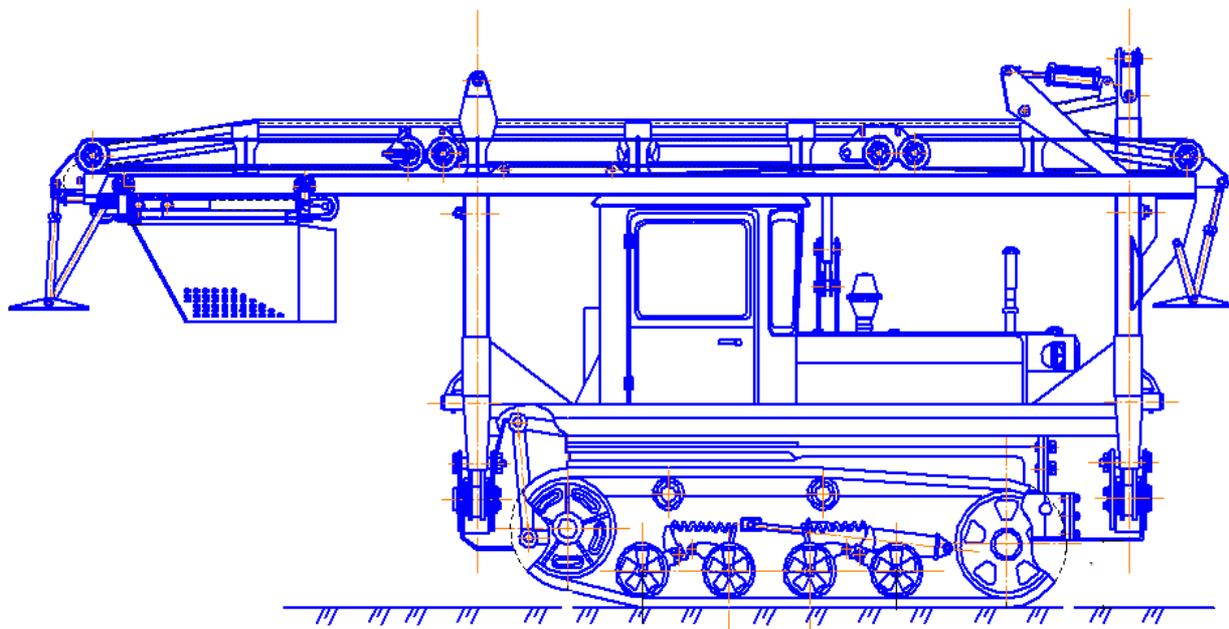


Рисунок 1 - Каналоочиститель РР-303

Изначально ковш прямоугольного профиля для каналоочистителя РР-303 был спроектирован для очистки закрепленного дна осушительных каналов (рис. 2). Однако, следует учитывать значительное количество и большую протяженность каналов с незакрепленным дном (рис. 3).



Рисунок 2 - Очищенный канал с закрепленным дном



Рисунок 3 - Очистка канала с незакрепленным дном
одноковшовыми экскаваторами

На основе проведенных экспериментальных исследований предложен новый ковш, защищенный патентом на изобретение №2500858. Ковш каналоочистителя [4], включающий днище, боковые стенки с режущими кромками и заднюю стенку, отличающийся тем, что боковые стенки соединены с днищем под углом 45° , образуя трапециевидальное сечение, копирующее дно и прилегающие к нему части откосов канала, боковые стенки и днище имеют заострение режущей кромки. Толщина боковых стенок и днища уменьшается по длине ковша. Такое решение позволяет уменьшить тяговые сопротивления, возникающие вследствие бокового трения стенок ковша о грунт. Применение нового ковша каналоочистителя обеспечивает очистку не только дна каналов трапециевидального профиля от наносов и заилений, но и прилегающих ко дну частей откосов (рис. 4).

Здесь также следует отметить, что предлагаемый ковш трапециевидального сечения не может очищать всю поверхность откосов осушительных каналов, в том числе от кустарниковой растительности. Отсутствие универсальной машины для полной очистки профиля осушительных каналов вызывает необходимость поиска новых технологических решений. Одним из таких решений является применение комплекса, включающего машину для очистки дна канала от наносов и машину для очистки откосов. Необходимо также решение вопроса организованной укладки и утилизации наносов и растительности.

В состав рекомендуемого комплекса может входить каналочиститель РР-303 с модернизированным рабочим органом предлагаемой конструкции.

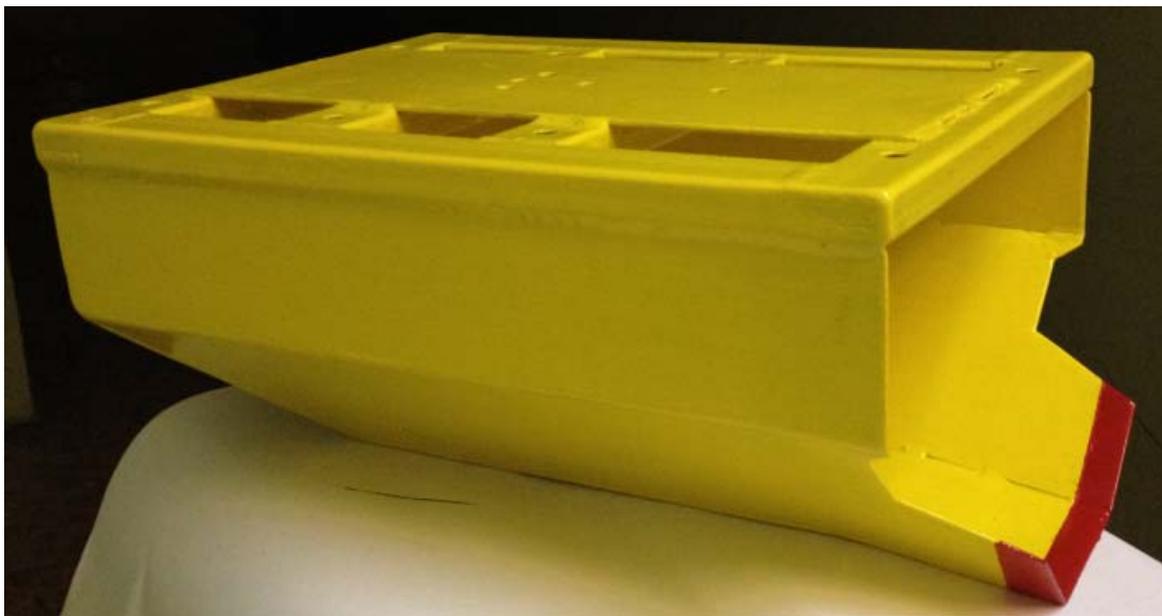


Рисунок 4 - Модель ковша каналочистителя РР-303 с трапецеидальным сечением

Список использованных источников

3. Мелиоративные и строительные машины. Г.А. Рябов, И.И. Мер, Г.Т. Прудников. – М.: Колос, 1976. – 360 с.
4. Мелиоративные машины. / Под редакцией И.И. Мера. – М.: Колос 1980. – 351 с.
5. Техническая эксплуатация гидромелиоративных систем. Л.И. Бадаев, В.М. Донской – М.: Колос, 1992. – 270 с.
6. Патент РФ на изобретение № 2500858. Ковш каналочистителя / Абдул-мажидов Х.А. Зарегистрирован 10.12.2013 г.

УДК 626 862. 2

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ УКЛАДКИ ДРЕНАЖА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Г.Х. Бедретдинов

ФГБНУ "ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова", г. Москва, Россия

По данным Министерства сельского хозяйства в России работы по восстановлению осушительных систем требуется провести на площади более 1,586 млн. га, в числе которых ремонт и восстановление коллекторно-дренажной сети составляет около 60% [1].

Традиционно восстановление работоспособности дренажной сети выполняется двумя методами: очисткой существующих или прокладкой новых дрен. Очистка дренажных труб выполняется в процессе эксплуатации осушенных земель. Это предотвращает полное заиливание и выход из строя дренажной системы. При высокой степени заиливания очистка выполняется с час-

тичным или полным вскрытием дрен, что равносильно строительству нового дренажа [2]. При очистке дрен из пластмассовых труб требуется проведение дополнительных работ по восстановлению их водоприемной способности. Сравнение стоимостных показателей процессов очистки и прокладки дренажа по действующим ведомственным нормам показывает, что при существующей степени заиливания дренажа наиболее выгодно прокладывать новые дрены.

Среди существующих способов укладки дренажа наиболее перспективным для восстановления осушительных систем является узкотраншейный способ строительства. Известно, что применение узкотраншейного способа, по сравнению с траншейным приводит к существенной экономии затрат на устройство дренажа. Однако с уменьшением ширины траншеи снижается водоприемная способность дрен, уменьшается междреннее расстояние и повышается удельная протяженность дренажа. В связи с этим возникает необходимость обоснования минимальной ширины траншеи и оценки её влияния на указанные параметры. Ширина отрываемой траншеи определяется по диаметру укладываемой дрены с учетом запаса на устройство дренажной обсыпки. Для укладки существующего размерного ряда дренажных труб расчеты ширины траншеи проводятся по их максимальному диаметру. По существующей технологии укладка дрен узкотраншейным способом выполняется в траншею шириной 250 мм. При данной ширине величина запаса на устройство дренажной обсыпки зависит от диаметра укладываемой дрены. С уменьшением диаметра дрены от 150 до 63 мм ширина от краев трубы до стенок траншеи увеличивается с 50 до 93 мм. Сравнение полученных значений с минимально допустимыми - 30...40 мм [3] показывает, что при укладке дрен малых диаметров расход фильтрующего материала за счет увеличения боковых запасов повышается 2,3 раза. Для ликвидации указанного недостатка рассмотрена возможность уменьшения ширины разрабатываемой траншеи. Расчеты показывают (рис. 1), что при уменьшении траншеи до 200 мм величины боковых запасов превышают допустимые значения при укладке труб диаметром до 120 мм. При укладке труб диаметром от 120 до 140 мм величины боковых запасов находятся в пределах минимально допустимых значений. При уменьшении ширины траншеи до 150 мм величины боковых запасов находятся в пределах минимально допустимых значений при укладке труб диаметром до 90 мм. При укладке труб диаметром выше 90 мм величины боковых запасов находятся в диапазоне ниже минимально допустимых значений.

Оценка узкотраншейных технологий показывает (табл.1) что наибольшие преимущества обеспечивает технология с шириной отрываемой траншеи 200 мм. Она охватывает почти полный диапазон диаметров укладываемых труб, обеспечивает снижение среднего объема дренажной обсыпки, а по ширине траншеи уравнивается с шириной щели, выполняемой при бестраншейной укладке дренажа.

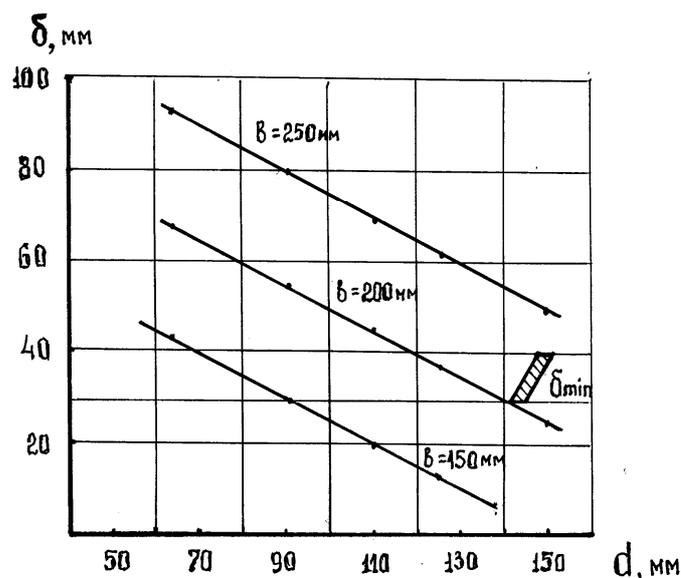


Рисунок 1 - Зависимости бокового запаса для устройства дренажной обсыпки (δ) от диаметра укладываемых дрен (d) при ширине траншеи (b)

Таблица 1 - Сравнительные показатели технологий укладки дренажа

Технологии	Ширина траншеи, мм	Диаметр укладываемых труб, мм	Среднее увеличение объема обсыпки, %%	Возможности технологии по потребности в трубах, %%
Существующая	250	до 150	89	100
Предлагаемая	200	до 140	38	99,7
Предлагаемая	150	до 90	0	93,5

Для оценки изменения водоприемной способности дрен в зависимости от ширины траншеи проведен расчет безразмерных фильтрационных сопротивлений Φ_i конструкции дрены, состоящей из пластмассовой трубы с синтетическим фильтром и дренажной обсыпкой. При этом в рассматриваемом случае ширина обсыпки определяется шириной дренажной траншеи b , а высота $h = D + 2\delta$, где D – наружный диаметр укладываемой дренажной трубы, м; δ - минимально допустимая толщина дренажной обсыпки, м.

Величина безразмерных фильтрационных сопротивлений для пластмассовых труб с фильтром и дренажной обсыпкой [4].

$$\Phi_i = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3, \tag{1}$$

где Φ_1 – сопротивление области дренажной обсыпки, Φ_2 - сопротивление области дренажного фильтра, Φ_3 – сопротивление прохождению воды в отверстия дренажных труб.

Сопротивления $\Phi_{1,2}$

$$\Phi_{1,2} = \left(\frac{k}{k_\phi} - 1 \right) \ln \frac{D + 2\delta_1}{D}, \tag{2}$$

где: k_{ϕ} - коэффициент фильтрации материала обсыпки или фильтра, м/сут. δ_l - толщина стенок обсыпки или фильтра, м.

Безразмерные фильтрационные сопротивления прохождению воды в щелевые отверстия пластмассовых дренажных труб (А.И. Мурашко, В.Т. Климков)

$$\Phi_3 = \frac{2s}{nl} \ln \frac{1}{\sin \frac{nl}{2s} \theta}, \quad (3)$$

где s - шаг перфорации, м; n - число рядов перфорации; l - длина щелей, ; $\theta = \arcsin \frac{\tau_0}{D}$; τ_0 - ширина продольно-щелевой перфорации, м.

При наличии дренажной обсыпки толщина её стенок δ_o связана с параметрами траншеи зависимостью [4]

$$\delta_o = \frac{0,53(b+h) - D}{2} \quad (4)$$

где: b - ширина обсыпки, м, h - высота обсыпки, м.

С учетом принятого постоянным выражения $h=D+2\delta_l$, для рассматриваемой задачи

$$\delta_o = \frac{0,53(b + D + 2\delta_l) - D}{2} \quad (5)$$

Тогда суммарная величина безразмерных фильтрационных сопротивлений

$$\Phi_i = \left(\frac{k}{k_{\phi o}} - 1 \right) \ln \frac{0,53(b + D + 2\delta_l)}{D} + \left(\frac{k}{k_{\phi}} - 1 \right) \ln \frac{D + 2\delta}{D} + \frac{2s}{nl} \ln \frac{1}{\sin \frac{nl}{2s} \theta} \quad (6)$$

Расчеты показывают (табл.2), что снижение ширины траншеи с 0,5 до 0,25 м повышает величину суммарных безразмерных фильтрационных сопротивлений на 27,1 %, а с 0,5 до 0,2 м - на 34,5%. Снижение ширины траншеи с 0,25 до 0,2 м (переход к предлагаемой технологии) повышает указанную величину - на 5,8 %.

Таблица 2 - Расчетные значения безразмерных фильтрационных сопротивлений для пластмассовой дрены диаметром 63 мм

Ширина траншеи, м	Φ_1	Φ_2	Φ_3	$\Phi_i (\Sigma \Phi)$
0,20	- 0,95	- 0,0054	3,14	2,1846
0,25	- 1,07	- 0,0054	3,14	2,0646
0,30	-1,18	- 0,0054	3,14	1,9954
0,40	-1,36	- 0,0054	3,14	1,7746
0,50	-1,51	- 0,0054	3,14	1,6246

При известной величине фильтрационных сопротивлений приток воды на единицу длины дрены [4]

$$Q = \frac{2\pi k H_p}{\Phi_o + \Phi_i}, \quad (7)$$

где: k - коэффициент фильтрации грунта, м/сут; H_p - расчетный напор, м; Φ_o - безразмерные фильтрационные сопротивления «идеальной» дрены (полости в грунте), определяемые граничными условиями фильтрации; Φ_i - безразмерные фильтрационные сопротивления на несовершенство дренажа по характеру вскрытия пласта, зависящие от конструкции дренажных труб, параметров защитных фильтров и схем их укладки.

Расчетные значения притока воды к дрене по зависимости 7 при $k=0,2$ м/сут, $H_p=0,71$ м, $\Phi_o=1$, составляют $Q_{50} = 0,339$, $Q_{25} = 0,291$, $Q_{20} = 0,280$, ($м^3/м$). То есть уменьшение ширины траншеи с 0,50 до 0,25 м снижает приток воды к дрене на 14,1%, с 0,5 до 0,2 м – на 17,4 %, а с 0,25 до 0,2 м – на 3,8 %.

По данным (табл. 2) рассчитаны междренные расстояния при ширине выполняемых траншей 0,5 м и 0,2 м. Расчет выполнен для однослойного грунта. В результате установлено, что уменьшение ширины траншеи с 0,5 до 0,2 м снижает междреннее расстояние на 8...10%.

Эффективность перехода от траншейного (ширина траншеи 0,5 м) к узкотраншейному способу (ширина 0,2 м) определяется по разности затрат за счет экономии материала дренажной обсыпки и дополнительных затрат, связанных с увеличением удельной протяженности дренажа.

При уменьшении ширины траншеи с 0,5 до 0,2 м экономия затрат на устройство обсыпки: $\Delta Z_o = (Q_{50} - Q_{20}) C_\phi L_{50}$. (8)

Дополнительные затраты за счет увеличения удельной протяженности дренажа: $\Delta Z_L = (Q_{20} C_\phi + C_T + C_{y20})(L_{20} - L_{50})$, (9)

где Q_{50} , Q_{20} - удельные расходы фильтрующего материала, $м^3$ на 1 м дрены, при ширине траншеи соответственно 0,5 и 0,2 м; C_ϕ - стоимость материала фильтрующей засыпки руб/ $м^3$; L_{50} , L_{20} - удельная протяженность дренажа, м/га при ширине траншеи соответственно 0,5 и 0,2 м; C_T - стоимость дренажной трубы, руб/м; C_{y20} - стоимость укладки дрены руб/м при ширине траншеи 0,2 м.

Сомножитель $(L_{20} - L_{50})$ выражения 9 может быть представлен в виде $X L_{50}$, где X - увеличение удельной протяженности дренажа за счет снижения ширины траншеи с 0,5 до 0,2 м. Приравнявая выражения 8 и 9 можно найти предельную величину:

$$X = \frac{(Q_{50} - Q_{20}) C_\phi}{(Q_{20} C_\phi + C_T + C_{y20})},$$

определяющую область эффективного применения узкотраншейного способа строительства дренажа.

В рассматриваемом случае расчетные удельные расходы фильтрующего материала $Q_{50} = 0,0684$, $Q_{20} = 0,0255$ $м^3/м$. Стоимость подготовленной песчано-гравийной смеси $C_\phi = 1100$ руб/ $м^3$. Стоимость дренажной трубы диаметром 63 мм с защитным фильтром 110 руб/м. Стоимость укладки дре-

ны $1853 : 75 = 24,7$ руб/м, где 1853 руб/ч стоимость машино-часа, 75 м/ч – эксплуатационная производительность дренаукладчика. При указанных параметрах граничное значение повышения удельной протяженности дренажа $X = 0,29$ или 29 %.

Таким образом, укладка дренажа в траншею шириной 0,2 м обеспечивает положительную эффективность при увеличении удельной протяженности дрен до 29 %. Полученные расчетные значения повышения удельной протяженности дренажа на 8...10 % ниже предельной величины. При этом расчетный экономический эффект для условно взятого междреннего расстояния $L_{50} = 20$ м, составит $\mathcal{E} = 18876 - 6510 = 12366$ (руб/га).

Для восстановления дренажной сети на осушенных землях рекомендуются усовершенствованные технологии укладки дрен и закрытых собираателей. В предлагаемой технологии укладки дрен ширина отрываемой траншеи принята равной 200 мм. Разрабатываемый грунт укладывается на бровки траншеи и отделяется от нее с двух сторон вертикальными экранами (рис. 2). Высота экранов $h_{\mathcal{E}}$ принята равной 0,4 м. В процессе отсыпки верхняя часть призм отсыпаемого грунта, превышающая высоту экрана передвигается на внешние откосы насыпей горизонтальными шнеками.

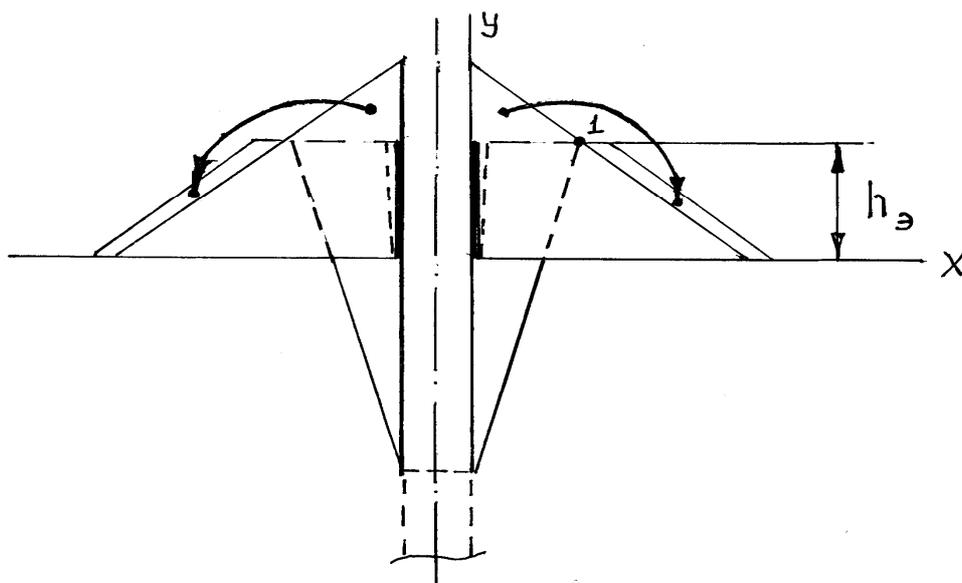


Рисунок 2 - Схема формирования грунта на бровках траншеи

Укладка дренажных труб выполняется на профильное основание, вырезаемое ниже дна отрываемой траншеи (рис. 3). Глубина профильного основания принимается равной ширине отрываемой траншеи. Такое соотношение обеспечивает минимальный объем работ и наилучшие условия для выполнения фильтрующей обсыпки. Для укладки на профильное основание предложена конструкция лемеха направляющей дренажной трубы (рис. 4). Лемех состоит из двух жестко соединенных между собой металлических труб разного диаметра. Меньшая секция предназначена для укладки труб малых диаметров, большая – для больших диаметров. Дренажная труба заправляется в соответствующую секцию, которая соединяется с направляю-

щей таким образом, чтобы рабочая секция была снизу. В нижней части рабочей секции устанавливаются сменные накладки, выполняющие профилирование поверхности нижней части отсыпки под диаметр укладываемой трубы.

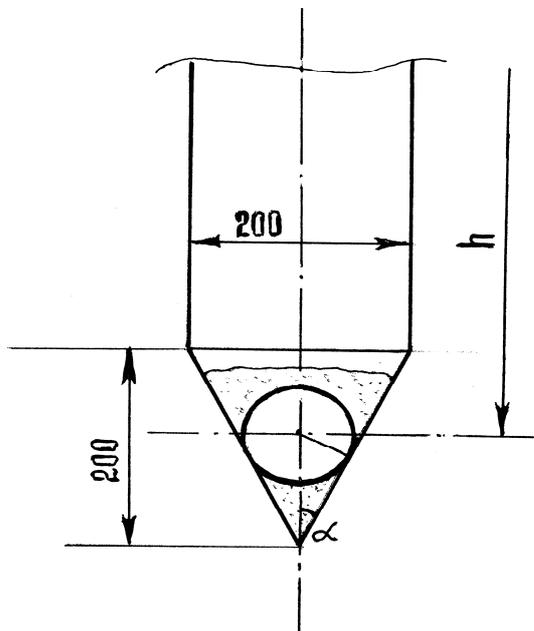


Рисунок 3 - Схема укладки грунта на профильное основание

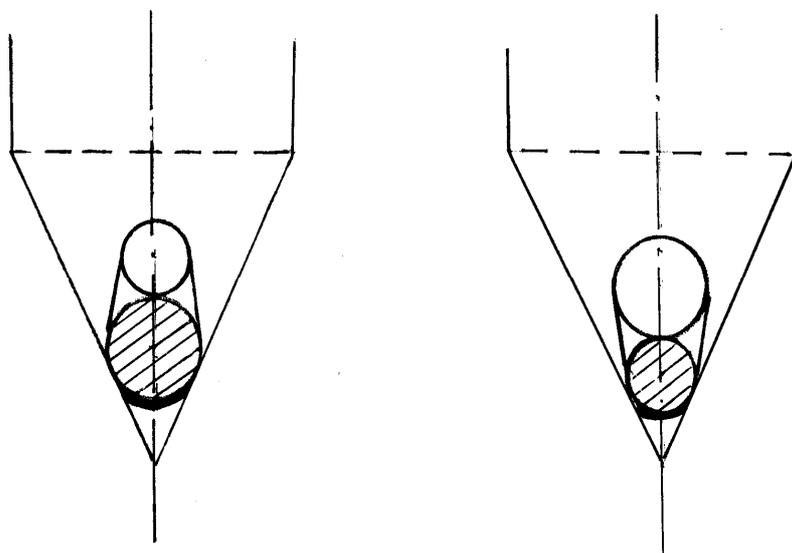


Рисунок 4 - Конструкция лемеха направляющей дренажной трубы

Технология устройства дренажной обсыпки (патент РФ № 2469149) включает: засыпку нижней части конусного углубления, профилирование поверхности засыпки под диаметр укладываемой трубы, укладку трубы и засыпку верха трубы (рис. 5). Предлагаемый способ позволяет выполнять дренажную обсыпку с минимальным расходом фильтрующего материала вне зависимости от диаметра укладываемых дрен.

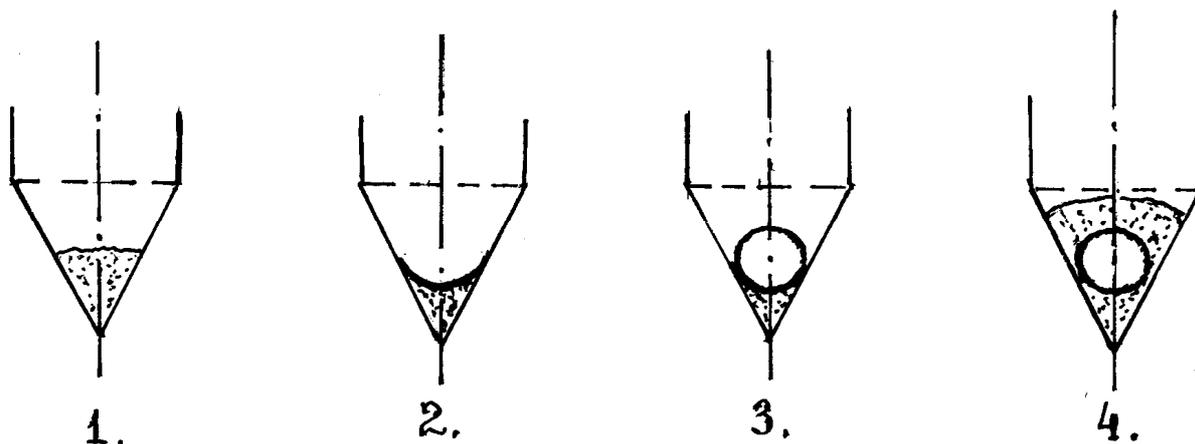


Рисунок 5 - Схема устройства дренажной обсыпки:

1- засыпка низа профильного основания; 2 - профилирование основания; 3 - укладка трубы; 4 - засыпка верха трубы

Обратная засыпка траншеи (патент РФ № 2469149) выполняется после укладки дренажной трубы и устройства обсыпки. С верхней части траншеи срезаются боковые призмы грунта, которым засыпается её нижняя часть. После засыпки нижней части траншеи постепенно снижается высота ограждающих экранов, и часть ранее отсыпанного на бровках грунта равномерно обрушается в воронку (рис. 6б). На заключительной стадии выполняется планировка поверхности над дренаем.

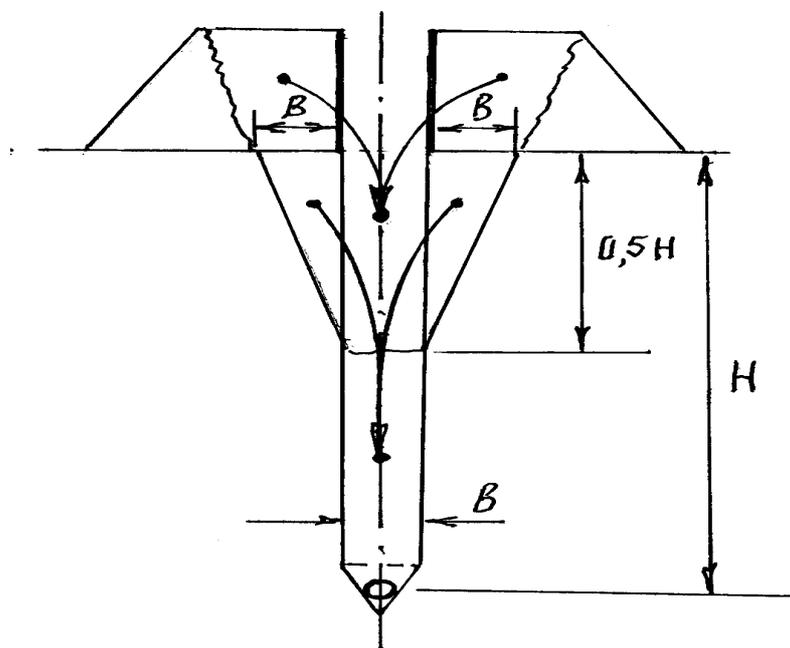


Рисунок 6 - Схема обратной засыпки узкой траншеи по новой технологии и рациональные параметры срезки боковых призм грунта

Предлагаемая технология укладки дрен позволяют выполнить более качественную обратную засыпку узкой траншеи. Технология укладки закрытых собирателей включает: отрывку траншеи с отсыпкой грунта на бровки, укладку дренажной трубы, засыпку траншеи фильтрующим материалом до основания пахотного горизонта, обратную засыпку верхней части траншеи

до уровня поверхности земли, разравнивание оставшегося грунта. В предлагаемой технологии ширина траншеи равна 200 мм.

Для создания условий связи дрены с поверхностью поля в верхней части выполняется воронка (рис. 7). Вынимаемый из траншеи грунт укладывается по обе стороны за бровки воронки горизонтальными шнеками. Укладка дренажных труб осуществляется на профильное основание, выполняемое зачистным ножом. Засыпка траншеи фильтрующим материалом выполняется после укладки дренажной трубы. Подача фильтрующего материала выполняется перегружателем в бункер дреноукладчика. Для снижения стоимости укладки предлагается добавлять в традиционную песчано-гравийную обсыпку измельченную щепу кустарниковой и кроновой части растительности (рис. 8). Обратная засыпка верха траншеи и разравнивание оставшегося грунта выполняется бульдозером.

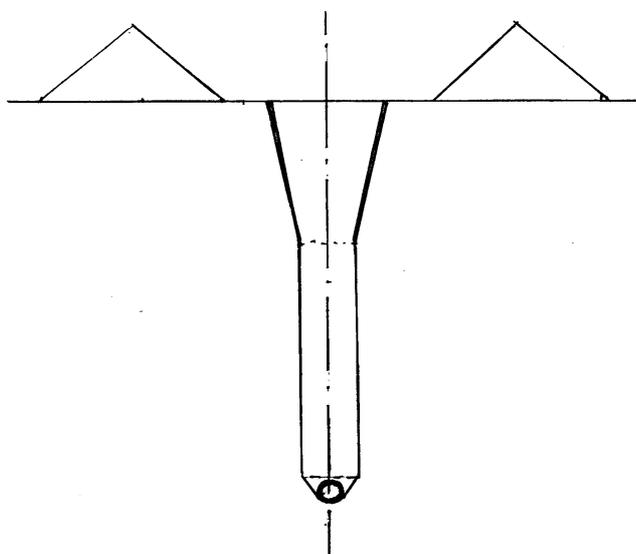


Рисунок 7 - Профиль траншеи для устройства закрытых собирателей

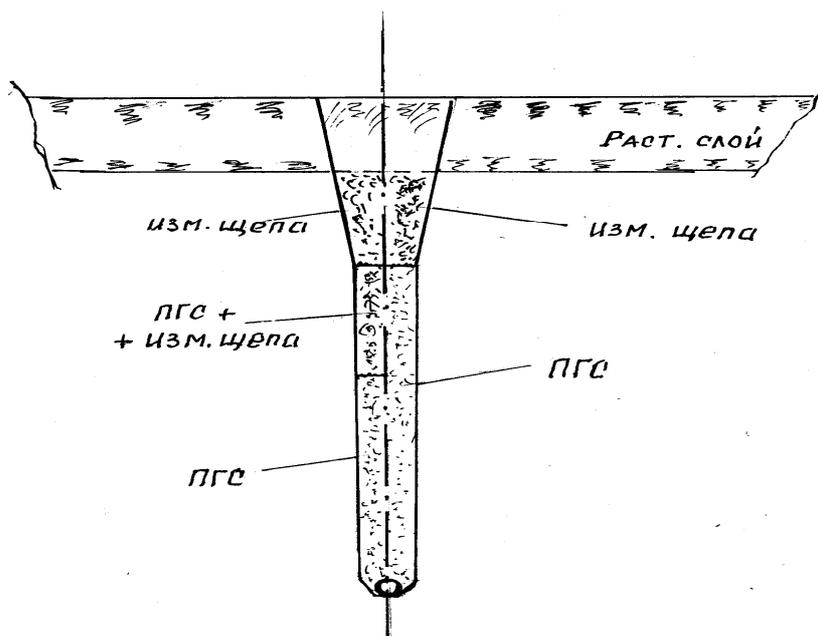


Рисунок 8 - Варианты конструкций закрытых собирателей

Для выполнения операций технологического процесса укладки дрен и закрытых собирателей предложены конструктивные элементы рабочего органа дреноукладчика (табл. 3).

Таблица 3 - Конструктивные элементы дреноукладчика для выполнения работ по предлагаемым технологиям

Технологическая операция	Выполняемые профили дрен	Конструктивные элементы машины
1. Отрывка траншеи	Траншея Воронка Профильное основание	Рабочая цепь Подрезной нож Сменные ножи
1. Отсыпка грунта	На бровки траншеи	Отбойная плита Экран Горизонтальные шнеки
3. Укладка дренажной трубы	На профильное основание	Лемех направляющей дренажной трубы
4. Устройство дренажной обсыпки	Дрены Закрытые собиратели	Дозаторы Перегружатель
5. Обратная засыпка траншеи	Дрены Закрытые собиратели	Подрезные ножи со шнеком Бульдозер

Предлагаемые технологии позволяют снизить объемы земляных работ, расход материалов и стоимость строительства дренажа.

Список использованных источников

1. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения на 03.12.2013 г., Минсельхоз России,- Департамент земельной политики, имущественных отношений и госсобственности, 2013, 64 с. (Электронный ресурс WWW. mcx.ru/doklad 2013 11 (2)).

2. Ясинецкий В.Г., Фенин Н.К. Организация и технология гидромелиоративных работ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Колос», 1975. 416 с.

3. Бейлин Д.Х. Механизация дренажных работ. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 1975. с. 180.

4. Справочник: Мелиорация и водное хозяйство. Осушение / Под ред. академика Б.С.Маслова. М.: "Ассоциация Экоост", 2001. с 130.

УДК 631.31: 631.51: 631.587: 631.67: 62-51

ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ НА РИСОВЫХ ЧЕКАХ

А.Н. Ефремов

ОАО Инженерный центр «Луч», г. Москва, Россия

В последнее время появилось и успешно развивается новое направление в сельском хозяйстве – точное (точечное) земледелие как совокупность технологий, технических средств и систем принятия решений, направленных

на управление различными характеристиками почвы, влияющими на урожайность растений [1, 2, 3]. Появившиеся различные технологии и технические средства (системы позиционирования, автоматические пробоотборники, датчики, бортовые компьютеры, измерительные комплексы и приборы, мобильные информационные системы и пр.) позволяют осуществлять следующие действия:

- проводить точечное обследование характеристик почв;
- собирать, накапливать и анализировать полученные данные;
- составлять карты прогноза урожайности выращиваемых растений;
- вносить минеральные и органические удобрения, химические мелиоранты в каждое поле с учетом выявленной изменчивости его характеристик с целью получения максимальной урожайности, уменьшения загрязнения окружающей среды и выращивания экологически чистой продукции;
- внедрять и контролировать намеченные рекомендации;
- проводить дальнейший мониторинг характеристик поля.

Концепция точного земледелия также применима к планировке рисовых чеков, целью которой для данного этапа ее понимания является повышение урожайности риса, снижение расхода поливной воды и обоснование выбора типов землеройных машин и технологий планировки чеков, обеспечивающих наименьшие затраты.

Известно, что урожайность риса прямо пропорционально, а расход воды обратно пропорционально зависят от точности планировки чека, оцениваемой среднеквадратическими отклонениями поверхности рисовых чеков относительно ее средней плоскости. На чеках, спланированных с точностью ± 3 см землеройными машинами с лазерным управлением, достигается максимальная урожайность и минимальный расход воды, в то время как на чеках, которые не планировались в течение 10-20 лет, наибольшие отклонения достигают до 30 см и даже более, а урожайность и расход воды имеют худшие показатели. Поэтому главным требованием подъема уровня возделывания риса является точная планировка рисовых чеков землеройными машинами с лазерным управлением.

Многолетними исследованиями ИЦ «Луч» установлено, что после проведения точной планировки чеков с течением времени наблюдается деформация спланированной поверхности. Такие деформации и потери урожайности и поливной воды с годами постоянно возрастают после первого года эксплуатации, несмотря на последующую ежегодную планировку чеков, выполняемую длиннобазовыми планировщиками без лазерного управления. Остается неясным влияние различных факторов на такие деформации, что мешает установить четкие сроки или периодичность проведения планировочных работ для поддержания высокой урожайности и экономии воды. В идеале хозяйства должны проводить самостоятельно или с привлечением специальных организаций мониторинг данных о текущем состоянии микро-рельефа, урожайности и расходе воды, и сроках проведения планировочных работ.

Состояние микрорельефа чеков сегодня мало изучено, фактических данных о съемке микрорельефа недостаточно для проведения объективной оценки. Это не дает возможности прогнозировать урожайность риса и расход воды на ближайшие годы, рационально планировать закупку техники для проведения планировки чеков.

В связи с выше изложенным, наметим следующие задачи по реализации точного земледелия на рисовых чеках:

- собирать и хранить исходные данные о геодезических (съемка) и почвенно-грунтовых характеристиках рисовых чеков;
- создать компьютерную базу собранного массива данных;
- управлять процессом дальнейшего сбора, учета и обработки поступающей информации;
- составлять текущие прогнозы урожайности риса и расхода поливной воды на чеке, карте по отдельным хозяйствам, районам и в целом по краю на ближайшие годы;
- определять динамику деформаций поверхности чеков в зависимости от времени и других факторов и установить периодичность проведения планировочных работ;
- определять при съемке и хранить проектные отметки планировки рисовых чеков, обеспечивающие баланс земляных работ;
- обосновать выбор землеройно-планировочных машин, технологий планировочных работ и технико-экономических показателей, на основе полученных геодезических и почвенно-грунтовых характеристик рисовых чеков.

Для решения поставленных этих задач остановимся пока на следующих геодезических и почвенно-грунтовых характеристиках точного земледелия на рисовых чеках:

- микрорельеф рисовых чеков и его расчетные показатели (вертикальные отметки поверхности, проектная отметка средней плоскости, среднеквадратическое отклонение поверхности, толщины срезов и подсыпок грунта, объемы земляных работ, дальности возки грунта);
- группа и плотность грунта, определяющие трудность его разработки рабочими органами землеройных машин;
- влажность грунта, от которой зависят условия работы машин;
- толщина плодородного слоя почвы, устанавливающая вид планировки и технологию планировочных работ.

В процессе проведения исследований и углубления концепции точного земледелия на рисовых чеках к этим характеристикам будут добавляться другие, такие как физико-химические свойства грунта, количество внесенных на чеки удобрений и средств защиты растений, сорта риса и т.п.

Рассмотрим в отдельности предлагаемые в настоящее время методы и способы определения выбранных геодезических и почвенно-грунтовых характеристик рисовых чеков.

Площадь одного чека колеблется от 3 до 15 га и в большинстве составляет 6 га. Крупные хозяйства содержат 6 тыс. га, куда входит 1000 и более чеков. Если учесть, что общая площадь рисовых оросительных систем в Краснодарском крае составляла в 2014 г. 134 тыс. га и в последующие годы планируется довести их до 160 тыс. га, то количество чеков соответственно будет равно примерно 22-27 тысяч. В этом случае один чек можно рассматривать как «точку» рисовой оросительной системы, которая определяет в целом его состояние поверхности. Для обобщения требуемых данных и составления прогноза урожайности и расхода воды необходимо иметь достаточно большое количество таких точек. Поэтому выбираемые методы и способы определения характеристик чеков должны быть высокопроизводительными и сравнительно недорогими.

Таким требованиям отвечает способ вертикальной съемки поверхности рисового чека с применением автонивелира (АН-2 и АН-3), который дает возможность автоматизировать процесс нивелирования, повысить скорость и точность съемки и сократить количество обслуживающего персонала [4]. Хранящиеся данные съемки из пульта управления автонивелира передают в компьютер с программным обеспечением ПО ЧЕК, которое рассчитывает вышеперечисленные показатели микрорельефа, составляет картограммы планировки чека и делает прогноз урожайности риса и расхода поливной воды в зависимости от величин отклонений отметок рельефа чека от проектной плоскости.

Автонивелир АН-3 устанавливают на транспортном средстве (рис. 1). Он состоит из приемника, пульта управления, датчика пути и соединительных кабелей. Приемник выполнен из набора вертикально расположенных фотодиодов (матрицы) и неподвижно закрепляется на транспортном средстве. Пульт, расположенный в кабине трактора, служит для приема сигналов от приемника, их индикации и хранения. Принцип работы системы основан на определении относительно лазерной опорной плоскости вертикальных ординат приемника (по засветке лучом лазера фотодиодов), равных высотным отметкам съемки. В процессе движения транспортного средства данные съемки автоматически записываются и хранятся в пульте, куда одновременно передаются и записываются сигналы от датчика пути, установленного на колесе трактора. Вертикальную съемку на чеке осуществляют из стартовой точки путем прямолинейного перемещения транспортного средства по отмеченным трассам челночным способом.

Для повышения производительности автонивелира предусматривается использовать наземную аппаратуру типа «Агронавигатор» (EZ-Guide 250 фирмы Trimble), работающую со спутниковой системой навигации GPS (Global Positioning System-Глобальная Система Позиционирования) и ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система). Эти системы позиционирования определяют в любой момент времени и с достаточной точностью мобильные координаты местонахождения движущегося объекта, что

позволяет управлять его перемещением на поле по намеченным прямолинейным маршрутам.

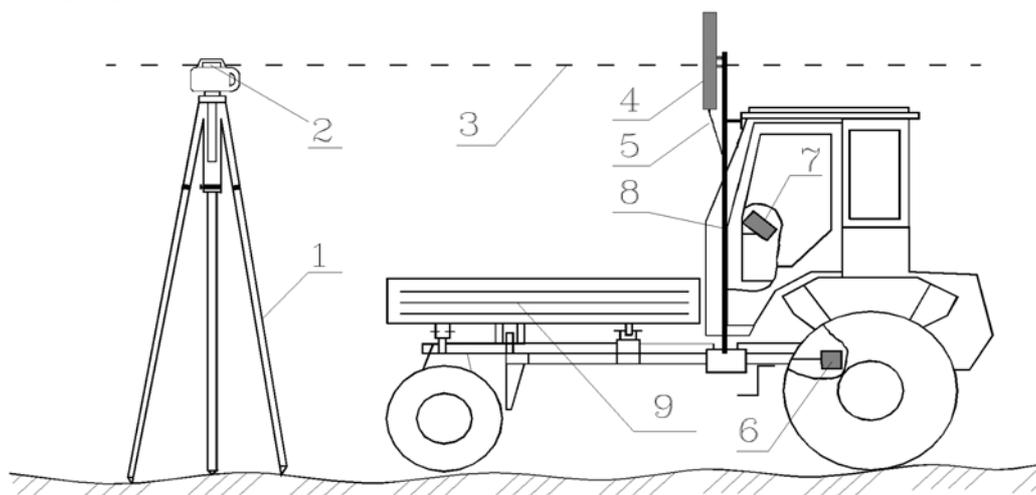


Рисунок 1 - Схема установки автонивелира АН-3:

1-штатив, 2-лазерный передатчик, 3-лазерная плоскость, 4-приемник, 5-кабель, 6-датчик пути, 7-пульт управления, 8-мачта крепления приемника, 9-транспортное средство (самоходное шасси)

Составленный проект (рисунки 2, 3) планировки чека используют для проведения планировки. Он также может служить в качестве паспорта рельефа чека и его следует хранить в базе данных хозяйства. По картограммам определяют объемы земляных работ на каждом чеке и среднюю дальность возки грунта, проектную урожайность и расход воды. Картограммы являются исполнительным документом для планировки чеков, по которому намечают маршруты движения машин с лазерным управлением [4].

КАРТОГРАММА МИКРОРЕЛЬЕФА ЧЕКА 5

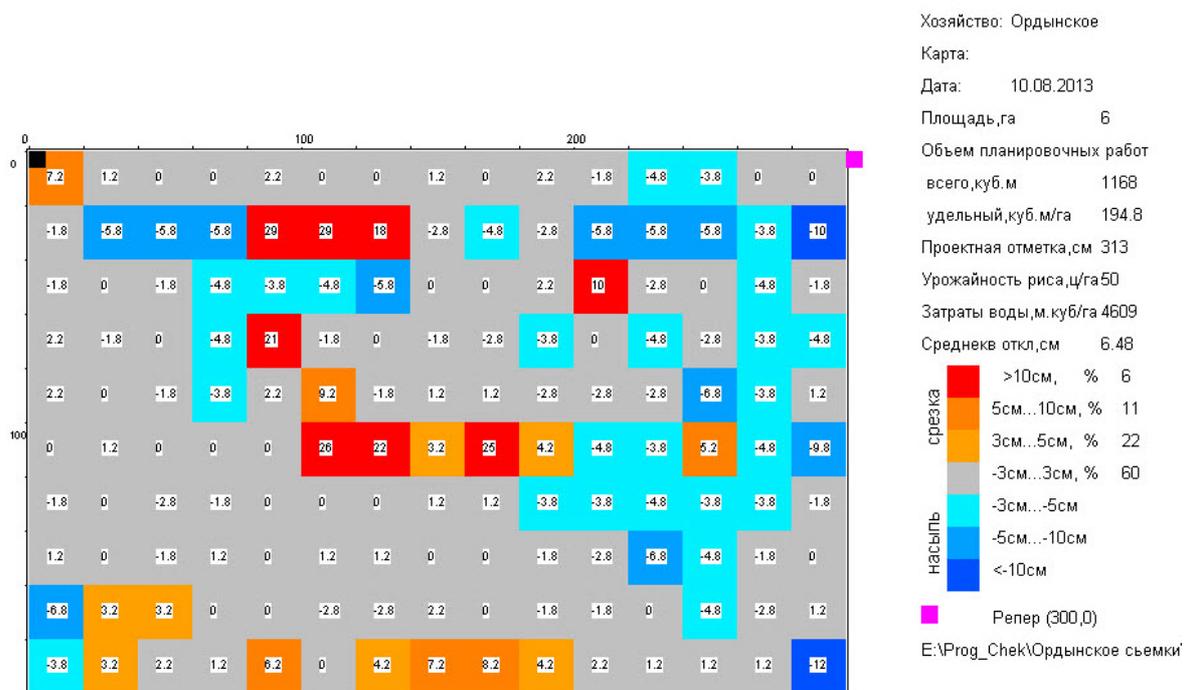


Рисунок 2– Картограмма проекта планировки чека

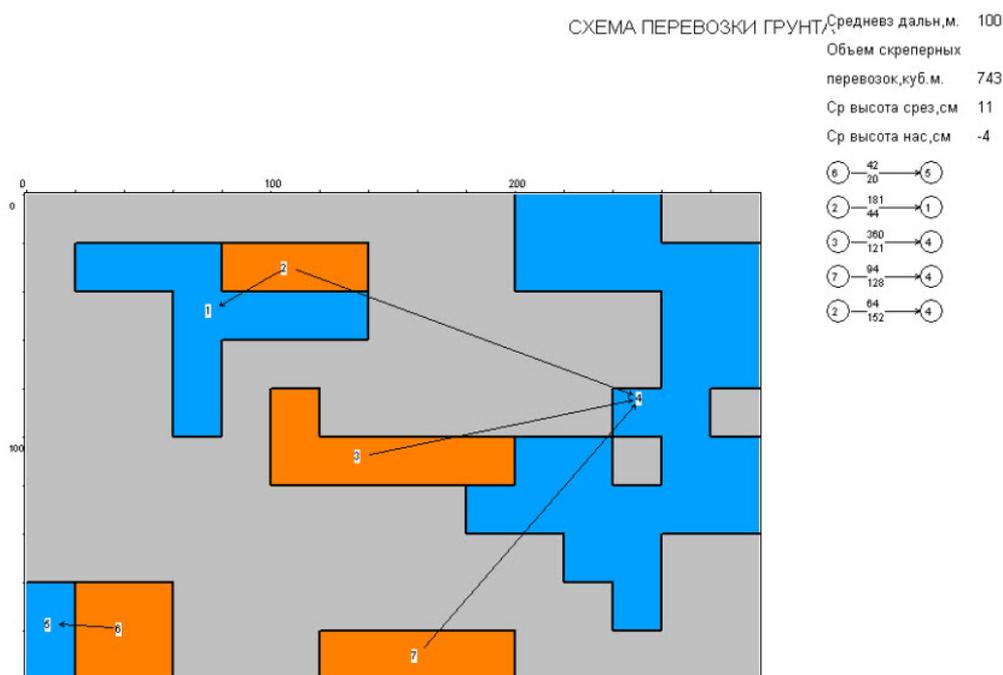


Рисунок 3– Схема возки грунта на чеке по проекту планировки

Помимо этого, проект планировки чека позволяет выбрать очередность планировки чеков исходя из худших показателей среднеквадратических отклонений. Планировка чека по проектной отметке наиболее эффективна, т.к. соблюдается баланс земляных работ, и землеройные машины перемещаются на чеке по оптимальным маршрутам с минимальным расходом горючего. Техничко-экономические показатели и стоимость планировочных работ можно рассчитывать по действующим нормативам в зависимости от установленных объемов земляных работ и средневзвешенной дальности возки грунта.

Для контроля точности и составления акта приемки спланированного чека также рекомендуется использовать автонивелир с программным обеспечением ПО ЧЕК. Сбор и обновление данных о микрорельефе на чеках с повторяющейся планировкой позволяет вести систематические наблюдения о деформациях поверхности чеков и давать предложения об их предотвращении или снижении в зависимости от выявленных причин и рекомендации о видах и сроках проведения планировочных работ.

Для обоснования выбора типов землеройных машин с лазерным управлением рассмотрим рисунок 4, где представлены зависимости удельных объемов земляных работ W и максимальных значений высот срезов H от среднеквадратических отклонений неровностей σ . Зависимости получены на основании анализа и обобщения картограмм рисовых чеков в различных хозяйствах Краснодарского края на общей площади 423 га [4].

Толщина срезки $H = 12$ см примерно соответствует объему земляных работ $W = 200$ м³/га и $\sigma = 5$ см (рис. 4). В этих условиях количество проходов скрепера, скрепера-планировщика или клин-планировщика, имеющих толщину срезки до 15 см, составляют не более 1. А количество проходов планировщика с бездонным ковшом – не более 2, т.к. он способен срезать

грунт толщиной до 7 см за 1 проход в грунтах 1 группы с влажностью до 20 %. Толщина срезки грунта скрепером 15 см ограничена конструктивными особенностями машины. Повышенная влажность грунта (до 30 %) при работе клин-планировщика объясняется особенностью резания клином, обеспечивающей свободный и быстрый сход грунта с его боковых поверхностей. Влажность грунта при использовании скрепера и скрепера-планировщика составляет 25 % за счет принудительной выгрузки грунта из ковша при помощи задней стенки и подвижного отвала.

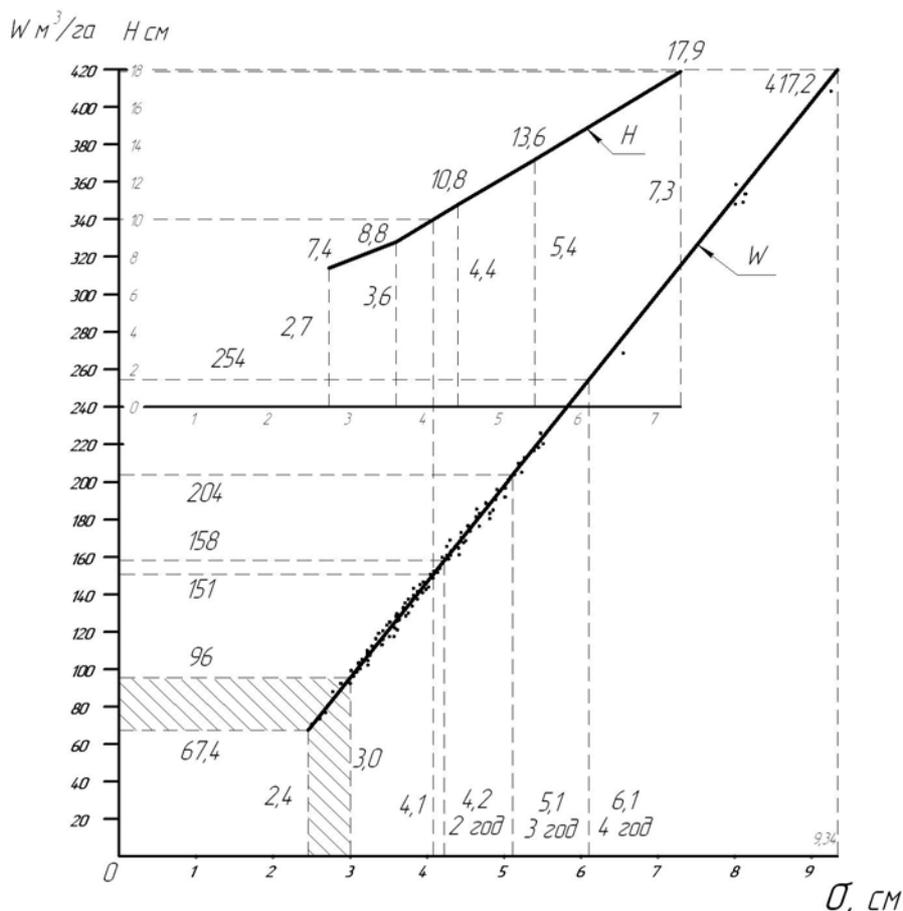


Рисунок 4 - Зависимости удельных объемов земляных работ W и высот срезов H от среднеквадратических отклонений σ

Из практики проведения планировки скреперами известно, что эффективность набора ковша грунтом зависит от толщины срезки. При движении скрепера вдоль мелких срезов происходит длительная и неполная загрузка ковша. Поэтому наиболее целесообразно использовать скрепер при толщине срезки более 12 см. С ростом толщины срезки пропорционально увеличиваются объемы земляных работ и количество проходов. Прицепной скрепер эффективно используют в грунтах 1-2 группы при дальности возки более 50 м.

На основании изложенного в таблице 1 представлено обоснование предварительного выбора типа землеройной машины с лазерным управлением для планировки земли.

Таблица 1 - Обоснование выбора типа землеройной машины с лазерным управлением

Критерии выбора							Тип машины с лазерным управлением
Средне-квадратические отклонения, σ , см	Максимальная толщина срезки, см		Количество проходов машины при максимальной срезке грунта на чеке	Объем земляных работ, W , м ³ /га	Группа грунта	Влажность грунта, %	
	на чеке, Н	машиной					
5-10	12-20	15	1-2 и более	200 - 420	1 - 2	до 25	Скрепер
до 5	до 12	15	1	до 200	1	до 30	Клин-планировщик
до 5	до 12	15	1	до 200	1	до 25	Скрепер-планировщик
до 5	до 12	7	2	до 200	1	до 20	Планировщик

Из почвенно-грунтовых характеристик рисового чека следует прежде всего выбрать плотность, влажность грунта и толщину плодородного слоя почвы. Известны различные методы измерений плотности грунта, по которой устанавливают его группу. Наиболее простым способом является определение плотности грунта при помощи плотномера (ударник ДОРНИИ). Этот способ можно применить точно в различных квадратах чека, что недостаточно для объективной оценки. По нашему мнению, сбор данных о плотности грунта лучше проводить, например, с помощью специального устройства путем непрерывного измерения осадки нагруженного колеса в грунте с дальнейшей передачей записанной информации в компьютер для обработки. Такое устройство будет прицепляться к транспортному средству автотрактора, а запись данных съемки и плотности грунта будет происходить одновременно.

Влажность грунта измеряют или методом высушивания отобранных образцов или при помощи влагомеров путем погружения в грунт специальных зондов с датчиками из нержавеющей стали. Такие приборы фиксируют изменения диэлектрической постоянной и трансформируют данные в электрический сигнал, пропорциональный содержанию влаги в почве. Второй метод более производителен. Однако оба метода позволяют определять влажность точно.

Толщину плодородного слоя почвы определяют путем бурения скважин или отрывки шурфов на глубину плодородного слоя в различных местах

чека. В зависимости от величины плодородного слоя назначают или кулисную планировку, предназначенную для сохранения маломощного плодородного слоя почвы, или бескулисную планировку, проводимую при толщине плодородного слоя больше величин максимальных срезов грунта.

Представляется перспективным использование автоматического пробоотборника Amity A 2450 (Fritzmeier) для взятия образцов почвы на поле, что позволяет в лабораторных условиях определять различные характеристики почвы, включая плотность, влажность и толщину плодородного слоя. Оборудование пробоотборника массой 100 кг смонтировано на тракторе. Время отбора одной пробы 10-12 сек, глубина 61 см, количество проб за один проход 25.

Описанные методы определения геодезических и почвенно-грунтовых характеристик нуждаются в совершенствовании и широкой апробации. Планируется провести теоретические и практические исследования точного земледелия на рисовых чеках и с этой целью необходимо поставить следующие первоочередные задачи:

- разработать программное обеспечение для определения плана расположения рисовых оросительных систем на основе данных съемки рисовых чеков;
- разработать программное обеспечение для составления паспортов рисовых чеков с геодезическими и почвенно-грунтовыми характеристиками;
- определить технологические показатели съемки чеков автонивелиром с аппаратурой типа «Навигатор»;
- разработать конструкцию устройства, смонтированную на транспортном средстве автонивелира, для непрерывного измерения плотности грунта и определить возможную зависимость между плотностью и влажностью грунта;
- выбрать и апробировать наиболее рациональный способ измерения влажности грунта и толщины плодородного слоя.

Выводы

1. Задачей точного земледелия в сельском хозяйстве и мелиорации является получение максимальной урожайности, уменьшения загрязнения окружающей среды и выращивания экологически чистой продукции на основе проведения обследования, сбора, накопления и анализа информации о различных характеристиках почв с целью их планомерного улучшения. Концепция точного земледелия также применима к планировке рисовых чеков и предусматривает повышение урожайности риса, снижение расхода поливной воды и обоснование выбора типов землеройных машин и технологий планировки чеков путем сбора, анализа и обобщения геодезических и почвенно-грунтовых характеристик чеков.

2. В настоящее время состояние микрорельефа чеков мало изучено, фактических данных о съемке микрорельефа недостаточно для проведения объективной оценки. Это не дает возможности прогнозировать урожайность

риса и расход воды на ближайшие годы, рационально выбирать и планировать закупку техники и сроки проведения планировочных работ. Поэтому возникает необходимость в массовом сборе информации по съемке чеков и на этой основе создать компьютерную базу данных микрорельефа чеков и систематически вести прогноз урожайности риса и расхода поливной воды.

3. Наиболее производительным способом вертикальной съемки микрорельефа рисовых чеков является применение автонивелира, что дает возможность автоматизировать процесс нивелирования, повысить скорость и точность съемки и сократить количество обслуживающего персонала. Данные съемки из пульта управления автонивелира передаются в компьютер с программным обеспечением ПО ЧЕК, которое позволяет определять расчетные показатели микрорельефа, составлять картограммы планировки чека и делать прогноз урожайности риса и расхода поливной воды. Сравнение проектов съемки различных чеков позволяет выбрать очередность планировки исходя из худших показателей среднеквадратических отклонений чеков.

4. Для контроля точности и составления акта приемки спланированного чека также рекомендуется использовать автонивелир с программным обеспечением ПО ЧЕК. Сбор и обновление данных о микрорельефе на чеках с повторяющейся планировкой позволяет вести систематические наблюдения о деформациях поверхности чеков и давать предложения об их предотвращении или снижении в зависимости от выявленных причин, а также рекомендации о видах и сроках проведения планировочных работ.

5. Планировка чека по проектной отметке наиболее эффективна, т.к. привязка проектной отметки к постоянному реперу позволяет многократно в течение ряда лет проводить планировку без проведения съемки. Кроме того в этом случае соблюдается баланс земляных работ, а землеройные машины перемещаются на чеке по оптимальным маршрутам с наименьшими затратами. Техничко-экономические показатели планировки можно рассчитывать в зависимости от установленных показателей проекта.

6. Намечены методы оценки плотности и влажности грунта и толщины плодородного слоя почвы. Предлагаемые методы определения геодезических и почвенно-грунтовых характеристик рисовых чеков дают достаточно ясную картину для выбора типа землеройно-планировочных машин и технологий планировочных работ. Поставлены первоочередные задачи по расширению возможностей программного обеспечения для составления паспортов чеков с геодезическими и почвенно-грунтовыми характеристиками, по дальнейшему совершенствованию технологии съемки с применением автонивелира и рациональному выбору методов измерений почвенно-грунтовых характеристик чеков.

Список использованных источников

1. Личман Г.И., Марченко Н.М., Дринча В.М. Основные принципы и перспективы применения точного земледелия. ГНУ ВИМ М., 2004, 81 стр.

2. Белавцева Т.М. Технологии точного земледелия, их перспективы и возможности использования на мелиоративных землях. Вопросы мелиорации № 1-2, ФГНУ «ЦНТИ «Мелиоводинформ», М., 2010, 60-71 стр.

3. Балабанов В.И., Березовский Е.В. Технологии точного земледелия и опыт их применения. Отраслевой журнал по спутниковой навигации. Глонавс, Вестник, № 1, М., 2011, 20-25 стр.

4. А.Н. Ефремов. Планировка земель с применением лазерных земель. М.: ООО «Литера-Принт», 2014-с.130.

УДК 631.6

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ФЦП «РАЗВИТИЕ МЕЛИОРАЦИИ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА 2014-2020 гг.»

Б.М. Кизяев, Н.Б. Мартынова

ФГБНУ "ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова", г. Москва, Россия

Глобальное потепление климата резко обостряет зависимость сельскохозяйственного производства от погодных условий и создает проблемы обеспечения продовольствием населения во всех странах мира. В таких условиях существенно возрастает роль мелиорации как основного инструмента для обеспечения продовольственной безопасности.

В России развитие мелиорации определялось перспективными планами развития страны, увязывалось с мощностями отечественного машиностроения и производства строительных материалов. Создание, производство и использование всей сельскохозяйственной техники, в том числе и мелиоративной, выполнялось в стране в соответствии с Системой Машин. Анализируя более чем полувековой период существования Системы Машин для комплексной механизации мелиоративных работ мы видим четкую динамику изменения номенклатуры мелиоративной техники в зависимости от программы, видов и объемов работ.

Если на первом этапе 1955-1965 гг. это были единицы машин (36 из них 5 новых), то после 1966 года номенклатура специальной техники выросла в десять раз и в последующие годы до 1990 гг. увеличивалась в среднем в 1,5-2 раза каждые 5 лет, а парк машин в мелиоративных организациях вырос от десятков машин до нескольких тысяч (рис. 1).

Развитие мелиорации земель РФ в переходный период к рыночной экономике существенно замедлилось. Мелиоративное состояние более чем 50% земель резко ухудшилось, повсеместно наблюдаются подъем уровня грунтовых вод, вторичное заболачивание, зарастание элементов открытой сети и сельскохозяйственных полей древесно-кустарниковой растительностью. Исходя из этого, приоритетные направления в мелиорации земель связаны с совершенствованием работ по эксплуатации мелиоративных систем, удалению древесно-кустарниковой растительности, реконструкции и строительству дренажа на мелиорированных землях и поливной техники.

Для обеспечения продовольственной безопасности страны актуальным стало восстановление мелиорированных земель и повышение их плодородия.

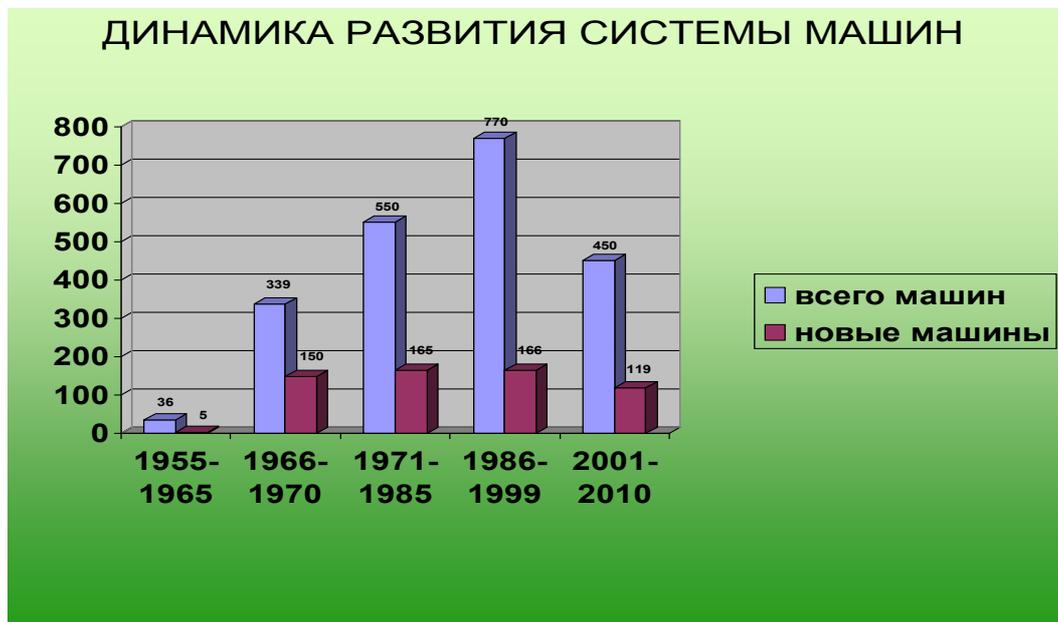


Рисунок 1 - Динамика развития системы машин

Для реализации ФЦП «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения на 2014-2020 гг.» ВНИИГиМ разработана система методов, технологий и средств механизации по восстановлению мелиоративных систем на малопродуктивных и деградированных землях.

Разработана схема восстановления осушительных систем. В предлагаемой схеме работы на поле выполняются безальтернативным методом, работы на сети и сооружениях двумя альтернативными методами: с ремонтом или строительством нового элемента. Объемы работ по восстановлению деградированных земель составляют 13...18%, осушительной коллекторно-дренажной сети - 75...82%, сооружений на сети - 5...7% от общего объема работ по осушительным системам. Разработаны усовершенствованные технологии, включающие работы по расчистке русл от древесно-кустарниковой растительности и ее утилизации.

Предложены технологии и средства механизации для выполнения работ по срезке и удалению растительности, очистке каналов от наносов с наличием корней и мелких древесных остатков. Предложено утилизацию мелкого кустарника и кроновой части деревьев выполнять на приканальной территории с измельчением на щепу и укладкой под основание пахотного горизонта с остатками травы и наносов. Предлагаемые технологии позволят ускорить процесс обезвоживания отвалов наносов и выполнить ремонт без нарушения работы магистрального канала.

Установлено, что наличие травянистой растительности повышает стоимость ремонта в 1,5 раза, мелкой древесной растительности – в 2,6 раза. Получены зависимости стоимости ремонта от величины слоя заиления и

рассчитаны стоимости прокладки нового русла канала при современном уровне цен. Установлено, что ремонт заросших и заиленных каналов целесообразно проводить при заилении каналов до 50% от их проектной глубины; при больших заилениях целесообразно прокладывать новое русло с ликвидацией старого канала. Получены корреляционные зависимости, устанавливающие взаимосвязи основных параметров с производительностью ведущих машин, позволяющие адаптировать существующие и перспективные машины к новым технологиям.

Установлено, что при восстановлении закрытой сети и максимальных заилениях наиболее целесообразно выполнять прокладку новых дрен. В результате исследований установлена возможность уменьшения ширины отрываемой траншеи при укладке дренажа узкотраншейным способом до 200 мм. Установлена рациональная глубина профильного основания, равная ширине траншеи, при которой обеспечиваются наиболее благоприятные условия для укладки существующего размерного ряда дренажных труб.

Представляют интерес для стран СНГ разработанные конструкции экскаваторов-дреноукладчиков ДУ-4003 (ВНИИГиМ) для зоны орошения и ЭТЦ-203 (Беларусь) для зоны осушения. Параметры экскаваторов-дреноукладчиков представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики экскаваторов-дреноукладчиков

№№ п/п	Наименование параметров	ЭТЦ-203	ДУ-4003
1.	Тип машины	Гусеничная, самоходная	Гусеничная, самоходная
2.	Мощность, кВт	60	220
3.	Глубина траншеи, м	до 2,0	до 4,0
4.	Ширина траншеи, м	0,4	0,4
5.	Диаметр дренажной трубы, мм	110	160
6.	Скорость передвижения: рабочая, м/ч транспортная, км/ч	14...590 до 4,7	50...500 до 2,5
7.	Масса, т	12	28

Разработана новая технология восстановления полей, покрытых кустарниковой растительностью с применением тяжелой дисковой борона БДМ-2,5. Проанализированы технологии освоения заочкаренных земель. Установлено, что применение фрезерных машин эффективно при удалении кочек высотой до 25 см, при более высоких кочках для полного их измельчения требуется от трех до пяти проходов машины.

Для ликвидации многопроходности предложена новая технология обработки земель, включающая измельчение верхней части кочек, укладку измельченной массы между кочками, уплотнение измельченной массы вместе

с кочками и запашку уплотненной массы в почву, и предложен технологический комплекс машин.

Разработанная система методов, технологий и средств механизации восстановления мелиоративных систем на малопродуктивных и деградированных землях обеспечивает увеличение производительности труда до 1,5 раз и позволяет снизить себестоимость восстановления проектных русел на 20...25%.

Выявлено, что основными подходами к управлению мелиоративными режимами орошаемых и осушаемых земель должны стать модели, учитывающие вещественно-энергетические потоки в открытых системах. Это позволит обеспечить регулирование энергетического ресурса почвы, минимизацию экологических нагрузок при проведении комплексных мелиораций, а также учесть возможное влияние изменения климата на изменение потребности в мелиоративных мероприятиях и антропогенную нагрузку. Основными компонентами энергетического потока в агроландшафте являются: солнечная энергия, энергия почвообразования, энергия химических связей органического вещества зеленых растений, аккумулирующих солнечную энергию в процессе фотосинтеза, и энергия химических связей органического и минерального вещества почвы.

При проведении мелиоративной деятельности в уравнение добавляется дополнительный член, включающий совокупную антропогенную энергию от проведения гидромелиорации, агротехнических мероприятий (использование сельскохозяйственной техники, удобрений, средств защиты растений и пр.) и других видов антропогенных воздействий, в том числе и загрязнений почвенного покрова. При этом структуру составляющих изменения внутренней энергии и энергетическое состояние мелиорированного объекта можно представить, как разницу между поступающей энергией и производимой системой работы.

Для совершенствования технических средств комбинированного малообъемного увлажнения для условий сухостепной зоны Европейской части России разработаны две стационарные комбинированные системы, позволяющие осуществлять одновременно два способа орошения (капельное и мелкодисперсное), обеспечивающие заданные водный, пищевой режимы почвы, температуру и влажность приземного слоя воздуха. Новизна разработок подтверждена 2 патентами РФ.

Разработан комплект чертежей, позволяющий изготовить принципиально новую систему орошения, не имеющую аналогов. За счет более экономного расходования водных ресурсов до 20% снижается антропогенная нагрузка на водные ресурсы и обеспечивается повышение урожайности при более точном регулировании водного режима почвы и влажности приземного слоя.

Разработана технология оперативного контроля работы дождевальной техники с использованием ГЛОНАСС/GPS приёмника, обеспечивающего

передачу информации на удалённый терминал или в сеть Интернет и узловых элементов технологии.

Подобраны основные элементы электротехнической части и разработан макет устройства, что позволяет вести дистанционный мониторинг позиции и гидравлического режима работы дождевальной техники.

Разработана методика формирования региональных схем обеспечения водными ресурсами оросительных мелиораций, согласованных с требованиями к структуре схем комплексного использования и охраны водных объектов с учетом стоимости мероприятий по их гарантированному водообеспечению и рациональному размещению объектов гидромелиорации в регионе.

В соответствии с технологической схемой управления водными ресурсами на принципах построения расчетов «по требованию» оросительных мелиораций, требований комплексного использования и охраны водных ресурсов, начиная от потребителя до водоисточника, возникает необходимость гарантированного водоресурсного обеспечения проектируемых, реконструируемых, строящихся и эксплуатируемых объектов АПК.

Для этого создается база данных гидромелиоративных систем, включающая их состояние, воздействие на окружающие территории; комплексную оценку стоимости ремонта и реконструкции ГМС региона, учитывающую как техническое состояние инфраструктуры (в том числе отдельных ГМС), так и эколого-мелиоративное состояние мелиорируемых земель ГМС; градацию гидромелиоративных систем региона по эффективности использования капитальных вложений в ремонт, реконструкцию и новое строительство; оптимизацию природных, экономических и экологических показателей ГМС путем применения информационных технологий; определение показателей забора (изъятия) водных ресурсов из водных объектов (водоисточников) для нужд гидромелиоративных систем, сброса сточных вод; составление прогноза водоресурсного обеспечения гидромелиоративных систем на срок до 5 лет.

Предложена вариантная оценка доступности водных ресурсов для земель, нуждающихся в орошении/осушении (или иного водопотребителя АПК), по которой решающее значение может иметь величина энергетических затрат на доставку воды к месту локализации гидромелиоративной системы. Данный показатель должен связывать параметры источника водных ресурсов (геодезические отметки, объем допустимого изъятия воды из источника, продолжительность работы транспортирующей системы в течение года), положение места водовыдела (геодезические отметки, расстояние от водоисточника до точки водовыдела). Использование математического моделирования и ГИС-технологий определило методику описания математических моделей, алгоритма формирования региональных схем водоресурсного обеспечения оросительных мелиораций.

Заключение. Разработанные ВНИИГиМ инновационные технологии реконструкции систем и повышения плодородия мелиорированных земель

позволят повысить продуктивность сельхозугодий, обеспечат значительный рост производства сельхозпродукции и будут способствовать успешной реализации задач Федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения на 2014-2020 гг.» для обеспечения продовольственной безопасности страны.

УДК 631.01.020.05.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО БОРЬБЕ С ПОЧВЕННОЙ ЭРОЗИЕЙ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СНЕГОТАЯНИЯ

Н.Б. Мартынова

ФГБОУ ВПО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

Результаты исследований и практика свидетельствуют о том, что рациональное использование зимних осадков - одно из основных условий борьбы с засухой и важный резерв повышения урожайности сельскохозяйственных культур в районах недостаточного и неустойчивого увлажнения.

На территории европейской части Российской Федерации доля зимних осадков составляет 30-50 % от среднегодового их количества. Однако использование этой влаги не превышает 20 %. С одной стороны, эта влага не используется в сельскохозяйственном освоении территории, с другой стороны, интенсивное снеготаяние приводит к водной эрозии - смыванию плодородного слоя грунта талыми водами.

В лесостепных районах Западной Сибири, Поволжья, Центрально-Черноземной зоны запасы влаги в метровом слое почвы за счет снегозадержания к моменту посева яровых культур (апрель-май) можно повысить в 1,5-2 раза [1].

Противоэрозионные мероприятия включают снегозадержание, то есть увеличение периода снеготаяния, что позволит уменьшить поверхностный сток грунтовых вод и, следовательно, предотвратить размыв почвы. Снегозадержание проводится методом валкования – укатывания снежной массы в плотные валки, что значительно замедляет скорость таяния снега. Таким образом, снижается опасность вымерзания посевов озимых и тем самым повышаются почвозащитные свойства растительного покрова.

В районах, подверженных водной и ветровой эрозии, для уменьшения стока воды и повышения впитывания влаги искусственно удлиняют периоды таяния снега или ускоряют оттаивание почвы на полях. Для этого создают валы из снега, уплотняют его катками, разбрасывают по поверхности золу, торф, землю. Валы из снега высотой до 60 см образуют снегопахом-валкователем СВУ-2,6 (рис. 1). Высоту снежного вала регулируют перемещением отвалов 5 относительно полозков 6. Машина агрегируется с тракторами класса 30-50 кН.

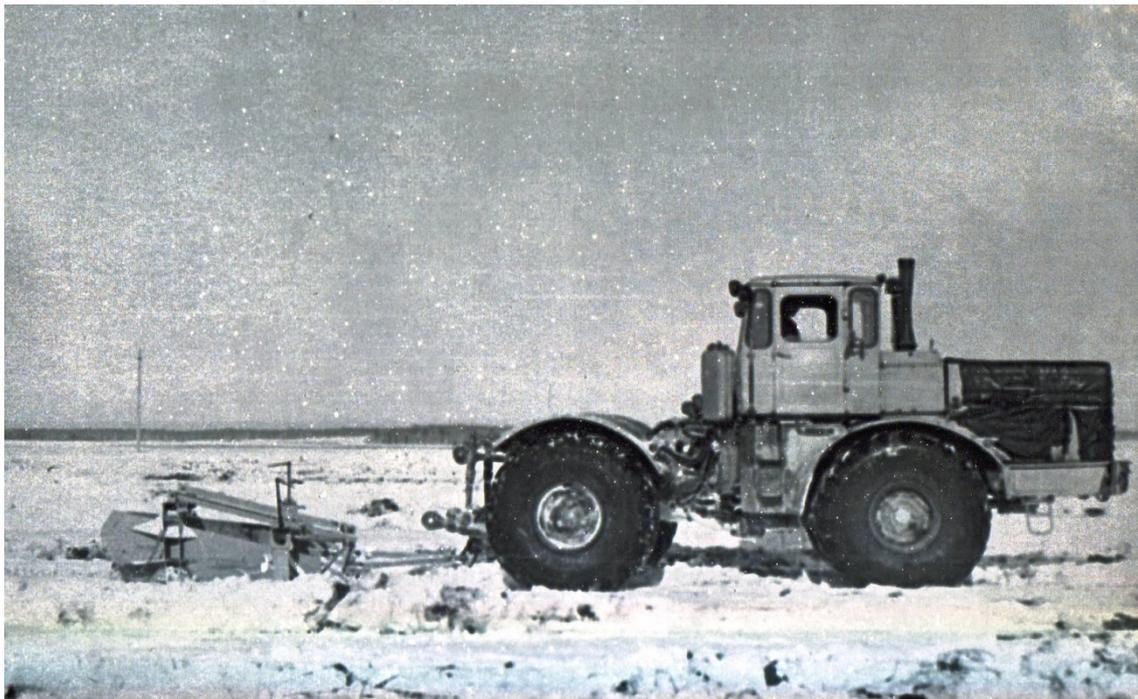
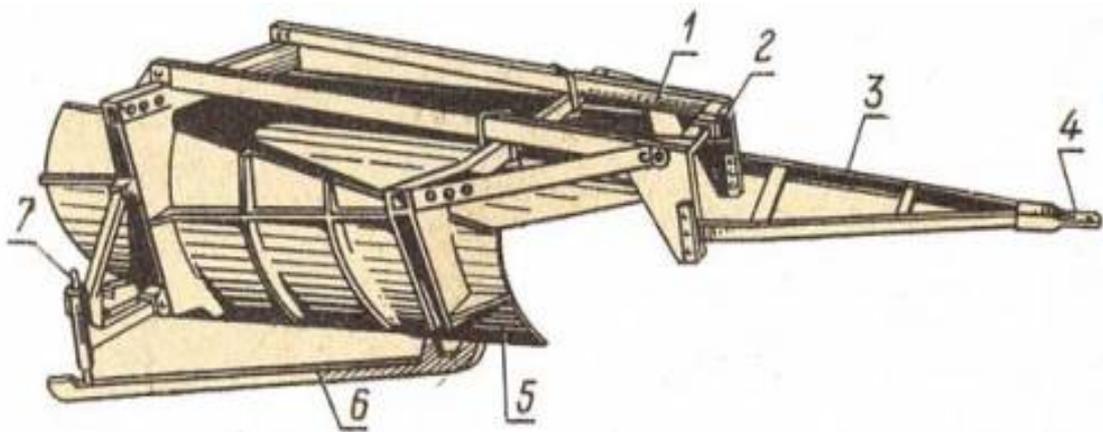


Рисунок 1 - Снегопах-валкователь СВУ-2,6:

1 - рама; 2 - рейка; 3 - тяга; 4 - прицепная серьга; 5 - отвал; 6 - полозки; 7 - регулировочный винт

Работа агрегата осуществляется поперек склона по челночной схеме с образованием валов через 5, 10, 15 или 20 м, в зависимости от крутизны. При крутизне 2-3° расстояние между валами устанавливают 10-15 м, на более крутых склонах чаще. Вали снега располагают поперек господствующих ветров или перекрестно на расстоянии 5-10 м друг от друга. Снегозадержание проводят сразу после выпадения первого снега. Так как земля еще не промерзла, то в случае оттепели талая вода полностью впитывается в почву. На полях с небольшим уклоном для уменьшения стока воды между полосами прикатывают снег тракторными катками. Если уклон поля большой, то снег прикатывают перекрестно.

К противоэрозионным мероприятиям относится также зачернение поверхности снега, например, разбрасыванием торфа. Если совместить зачернение поверхности с валкованием снега, можно повысить влагозарядку поч-

вы и существенно снизить почвенную эрозию. Сущность мероприятий по предотвращению водной эрозии состоит в уменьшении поверхностного стока, сохранении на поле максимального количества атмосферных осадков, переводе поверхностного стока во внутрипочвенный, в усилении противоэрозионной стойкости почв.

Отношение отраженного света к падающему потоку света характеризует отражательную способность поверхности:

$$K_{отр} = \frac{\Phi_o}{\Phi_n} \cdot 100\%,$$

где $K_{отр}$ – коэффициент отражения, измеряется в процентах; Φ_n – световой поток, падающий на данную поверхность, Вб; Φ_o – световой поток, отраженный от данной поверхности, Вб.

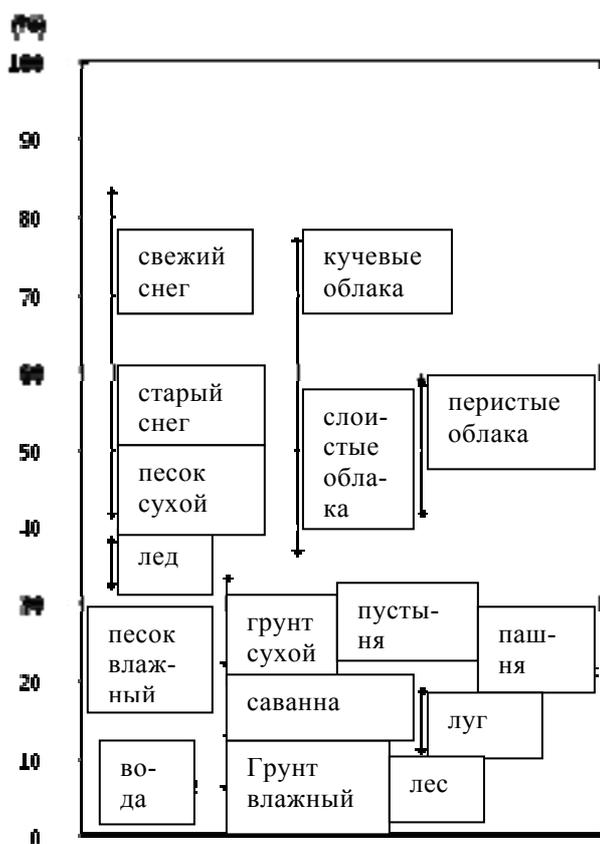


Рисунок 2 - Коэффициент отражения природных объектов [3]

По данным исследований [3] коэффициент отражения снега $K_{отр.снега} = 60-90\%$ в зависимости от влажности и срока выпадения, коэффициент отражения почвы без растительности $K_{отр.почвы} = 17\%$.

Влияние зачернения поверхности снега было проверено на опыте (рис. 3). На мерзлом грунте боковые части покрывающего снега утрамбовывались в плотные валки. Средняя часть расчищалась от снега с оставлением небольшого слоя. Сверху на тонкий слой снега насыпался торф ровным слоем.

Продолжительность опыта составила 4 часа. Температура окружающего воздуха +4°C.



Начало опыта.



Окончание опыта.

Рисунок 3 - Схема опыта по установлению влияния зачернения поверхности на протаивание снега

Результаты проведенного опыта показали, что снег активнее таял в средней зачерненной зоне. Растаявший снег равномерно распределялся по поверхности грунта, впитываясь в его слои.

Для проведения валкования и зачернения поверхности снега разработана комбинированная машина на базе трактора Т-170 (рис. 4). Конструкция

машины включает базовый трактор, навешенный спереди трактора клиновидный отвал шириной 4 м и прицепной агрегат шириной 8 м. С двух сторон на раме прицепного агрегата смонтированы валкователи, а между ними установлен бункер со шнековым транспортером и метателем.

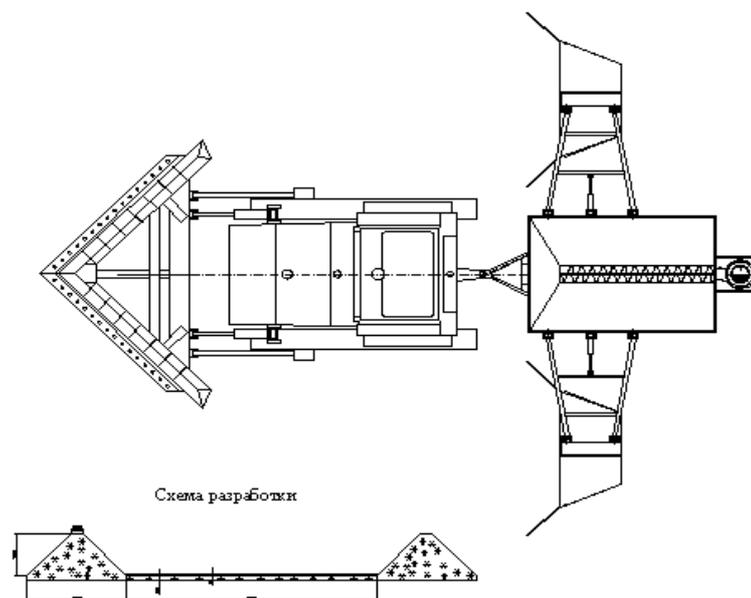


Рисунок 4 - Валкователь с дисковым разбрасывателем для зачернения поверхности снега

В процессе работы машины снег сгребается в стороны передним клиновидным отвалом и подается в зону работы валкователей. При проходе через валкователи валы снега уплотняется за счет изменения ширины проходного сечения с 2 м до 1,6 м и высоты с 0,8 м до 0,7 м.

В результате из снега формируются плотные валки клиновидной формы шириной основания 1,6 м, по верху 0,2 м и высотой 0,7 м. Остаточная высота снежного покрова после снятия части снега передним отвалом должна быть не менее 100 мм. Средняя часть между валками шириной 4 м подлежит зачернению торфом. Для этого бункер прицепного агрегата загружается торфом, который с помощью шнека диаметром 0,25 м подается на диск разбрасывателя. На диске диаметром 0,5 м расположены лопасти. Частота вращения диска 300 об/мин. Толщина разбрасываемого слоя 5 мм.

Расчетные технологические параметры машины

Производительность, га/ч	3,4
Рабочая скорость, км/ч	4,26
Энергоемкость разработки, кВт/га	38,82
Скорость разбрасывания торфа, м/с	7,85
Расход торфа, м ³ /га	25

Применение разработанной технологии позволит сократить время оттаивания почвы для повышения ее водопроницаемости, а также увеличить период снеготаяния, что приведет к сокращению поверхностного стока. Проводимые мероприятия позволят повысить влагозарядку почвы и урожайность возделываемых сельскохозяйственных культур.

Список использованных источников

2. Андреева, Д.М. Прогнозирование урожаев сельскохозяйственных культур по баллу пашни и влагообеспеченности территорий /Д.М. Андреева, Ф.Н. Леонов //Мелиорация переувлажненных земель. –2006. – №1 (55). – С. 103–105.

3. Заленский, В.А. Водообеспеченность растений – важный фактор стабильности урожаев /В.А. Заленский //Сельское хозяйство.-2005. – №6 (38). –С.14–15.

4. Астрономічний енциклопедичний словник. За загальною редакцією І. А. Климишина та А. О. Корсунь. — Львів, 2003. — С. 17. — 547 с. — ISBN 966-613-263-X.

УДК 631.316.22:001

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СРЕДСТВ ДЛЯ ДРЕНИРОВАНИЯ ПОЧВОГРУНТОВ

¹Новиков А.Е., ²Пындак В.И.

¹ФГБОУ «ВолГАУ», г. Волгоград, Россия;

²ФГБНУ «ВНИИОЗ», г. Волгоград, Россия

В Нижнем Поволжье использование на орошаемых землях интенсивных технологий возделывания сельхозкультур и нерациональных, на наш взгляд, систем отвальной и нулевой обработок почвы привело к нарушению физико-механического состояния почвогрунтов, повышению их комплексности и плотности, уменьшению пористости, развитию ирригационной эрозии и дефляции.

На эродированной и дефлированной пашне потери плодородия и недобор урожая сельхозкультур составляют от 5-10 (слабодеградированные почвы) до 60 % (сильнодеградированные почвы), производительность техники снижается до 15 %. Рациональное производство сельхозпродукции на таких землях возможно только при увеличенных дозах удобрений, которые сопоставимы в процентном соотношении с потерями гумуса.

Введение в оборот нарушенных земель, восстановление их плотности и структуры возможно за счёт мелиоративных глубоких обработок.

Разработанный нами [1] многофункциональный глубокорыхлитель, содержащий расположенные внизу прямой стойки дрены-кротователи почвогрунтов, обеспечивает: чизелевание, дренирование-кротование с рыхлением подпахотного горизонта, дополнительное рыхление почвы и подрезание сорняков. Как вариант, стойка приспособлена для внесения на заданную глубину жидкого удобрения или мелиоранта (рис. 1).

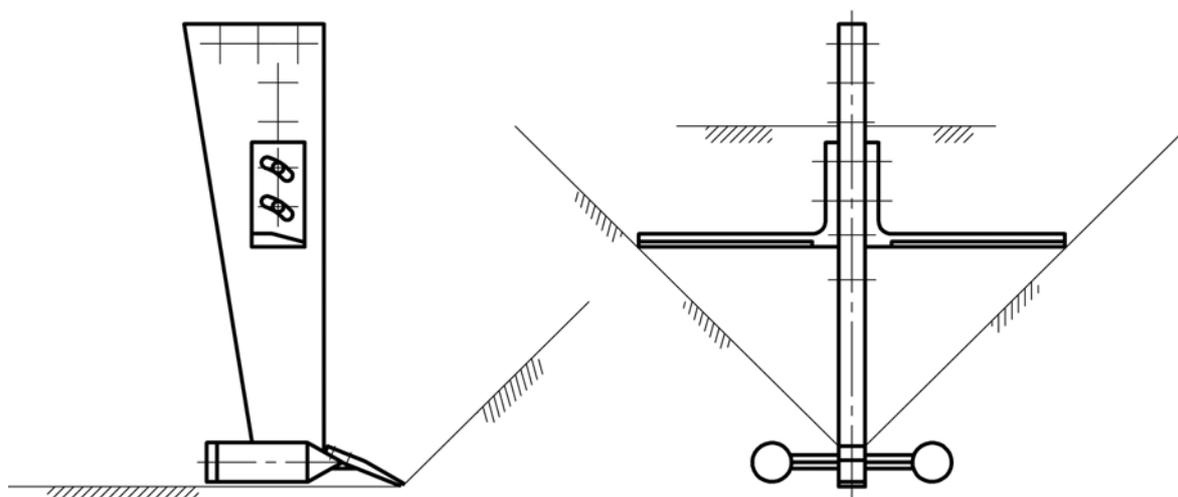


Рисунок 1 - Общий вид чизеля-глубококорыхлителя с дренажами-котователями

Процесс нарезания кротовин в подпахотных горизонтах является энергоёмким (по определению), однако этот приём, в связи с тенденцией некоторого подъёма уровня грунтовых вод в орошаемой земледелии, либо наоборот, необходимостью создания объёмных углублений в подпахотном горизонте для накопления продуктивной влаги, относится к числу актуальных. Энергоёмкость при обработке почв зачастую выражается посредством тягового сопротивления орудия. Исследования по энергоёмкости чизельных орудий (с прямой, наклонной и комбинированной стойкой) известны [2, 3 и др.], в нашем случае задача заключалась в определении тягового сопротивления дренажа. Нами предлагается энергоёмкость процесса нарезания дренаж-кротовин рассмотреть с позиций реологической механики [4 и др.].

При формировании кротовин в почвогрунте неизбежна остаточная деформация, которую в реологической механике принято называть *пластической*. Поэтому при определении тягового сопротивления дренажеров почвогрунт трактуется как упруговязкопластическая среда. Известно, что тяговое сопротивление почвообрабатывающего орудия R [2, 3 и др.] зависит от скорости движения МТА; при кротовании критерием оценки R становится предел прочности σ_p почвогрунта. На рисунке 2 показана схема напряжённо-деформированного состояния почвогрунта вокруг дренажа, где вокруг дренажа радиусом r_0 образуются две напряжённые – концентрические и кольцевые – зоны:

I, ограниченная радиусами $(r_0 - r_1)$, – область структурных деформаций, где напряжения превышают предел прочности σ_p почвогрунта;

II, ограниченная радиусами $(r_2 - r_1)$, – область упругих деформаций.

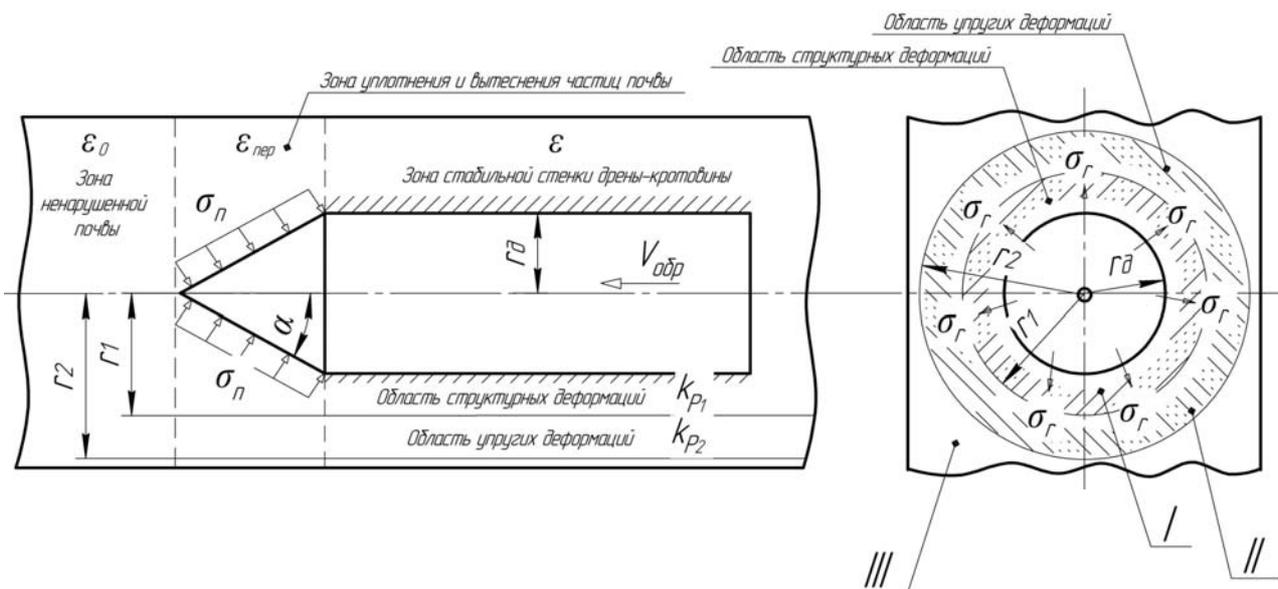


Рисунок 2 - Расчётная схема напряжённо-деформированного состояния почвогрунта при нарезании дрен-кратовин

Наряду с этим на конусе возникают нормальные напряжения σ_n (условно постоянные), которые также превышают предел прочности σ_p почвогрунта.

Таким образом, в отличие от обычных почвообрабатывающих рабочих органов дренирование-кратование почвогрунтов сопровождается потерей прочности почвогрунтов. Пластические деформации возникают вокруг цилиндрической части дренера – почва становится текучей. Вследствие этого формируется (по крайней мере в суглинистых и глинистых почвогрунтах) внутренняя относительно прочная оболочка кратовин (зона I).

В этой связи при расчётах возникает необходимость учёта сжимаемости почвогрунта, которая, в свою очередь, характеризуется компрессионной кривой и коэффициентом пористости k [4 и др.].

Компрессионные кривые имеют два участка:

на участке 1 значение коэффициента k_{P1} наибольшее, характер его изменения – логарифмическая зависимость, давления P_1 превышают предел прочности почвогрунта;

на участке 2 изменение (и уменьшение) коэффициента k_{P2} незначительно, характер изменения – прямая линия, давления P_2 не превышают предел прочности грунта;

переходная зона между участками 1 и 2 условна, плавная и в расчётах не учитывается.

Уравнение компрессионной кривой, как известно [4 и др.], имеет вид:

$$k_{P1} = k_{P0} - a \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right), \quad (1)$$

где k_{P0} – начальный коэффициент пористости, соответствующий начальному давлению P_0 ; k_{P1} – конечный коэффициент пористости, соответст-

вующий конечному давлению P_I ; a – сжимаемость почвогрунта, характеризующаяся коэффициентом компрессии.

Между коэффициентом пористости k , плотностью сложения почвы ρ и её пористостью (порозностью) ε имеется ряд зависимостей:

$$k_{P1} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}; k_{P0} = \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где ρ_s – предельная плотность твёрдой фазы почвы (2,4-2,8 г/см³).

Выражение для определения пористости массива почвы ε в зоне III (за пределами зоны II упругих деформаций), после необходимых преобразований может быть представлено в виде:

$$\varepsilon = \frac{r_1^2 \cdot \varepsilon_0 - r_\partial^2 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{r_1^2 - r_\partial^2}. \quad (3)$$

Здесь r_1 и r_∂ – соответствующие радиусы (рис. 2); ε_0 – начальное значение пористости (нетронутого почвогрунта).

Если в формулу (3) ввести коэффициент $\zeta = r_1 / r_\partial$ [5], то после необходимых преобразований, получим:

$$\varepsilon = \frac{\zeta^2 \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_0 - 1}{\zeta^2 - 1}, \quad (4)$$

т.е. текущее значение пористости – это функция начальной пористости ε_0 и коэффициента ζ – соотношения геометрических величин.

Подставив (4) в исходную формулу (2), получим зависимость для определения конечного значения коэффициента пористости k_{P1} как функции тех же величин (ε_0 и ζ). После преобразований имеем:

$$k_{P1} = \frac{\zeta^2 \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_0 - 1}{\zeta^2 - \zeta^2 \cdot \varepsilon_0 - \varepsilon_0}. \quad (5)$$

С учётом начального коэффициента пористости k_{P0} подставим уравнение (5) в формулу (1), проведём преобразования и получим выражение:

$$a \cdot \ln\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_p}\right) \frac{1 - 2 \cdot \varepsilon_0}{(1 - \varepsilon_0) \cdot (\zeta^2 - \zeta^2 \cdot \varepsilon_0 - \varepsilon_0)}. \quad (6)$$

Выражение (6) удобно представить в следующем виде:

$$\sigma_r = \sigma_p \cdot e^m, \quad (7)$$

$$\text{где } m = \frac{1 - 2 \cdot \varepsilon_0}{a \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot (\zeta^2 - \zeta^2 \cdot \varepsilon_0 - \varepsilon_0)}.$$

Для суглинистых светло-каштановых почв: $\varepsilon_0 \approx 0,488$; $a = 0,075 \text{ МПа}^{-1}$; $r_1 = 5 \cdot r_\partial$ [6]; при $|r_\partial|_{\min} = 0,04 \text{ м} \rightarrow r_1 = 0,2 \text{ м}$, тогда $\zeta = 5$, $m = 0,051$.

Для определения искомого усилия R воспользуемся уравнением для определения лобового сопротивления конусообразных рабочих органов машин для прокалывания почвогрунтов [7 и др.].

$$R = \pi \cdot r_{\partial}^2 \cdot \sigma_r \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha}, \quad (8)$$

где φ – угол трения рабочего органа о почву (22°); α – угол заострения резца дренера (угол конуса $\approx 45^\circ$).

Далее задача сводится к определению напряжения σ_p – предела прочности почвогрунта. Для этого воспользуемся реологической моделью Бингама [4]:

$$\sigma_{\varepsilon} = \eta \cdot \frac{dv}{dn} + \sigma_T, \quad (9)$$

где η – коэффициент вязкости среды, $\approx 0,00295$ Па·с; dv/dn – градиент скорости деформации (dv – разность скоростей соседних слоёв; dn – расстояние между слоями); σ_T – предел текучести деформируемого тела – напряжение, до превышения которого деформация не возникает.

Уравнение (9) по своей сути является условием образования кротовины при равномерном объёмном напряжённом состоянии почвогрунта, создаваемом дреном. Величина σ_{ε} представляет собой необходимое разрушающее напряжение (σ_p), при котором начинается необратимый процесс уплотнения (течения) почвогрунта при формировании кротовины, причём σ_{ε} зависит от градиента скорости деформирования.

Градиент скорости деформирования почвогрунта (с учётом некоторых условных допущений) при формировании дрены-кротовины можно представить в виде:

$$\frac{dv}{dn} = \frac{V_{\text{обп}} \cdot \sin \varphi}{r_1}, \quad (10)$$

где $V_{\text{обп}} \cdot \sin \varphi$ – вертикальная составляющая скорости деформирования частиц почвогрунта.

С учётом зависимости (10) уравнение (9) примет вид:

$$\sigma_p = \eta \cdot \frac{V_{\text{обп}} \cdot \sin \varphi}{r_1} + \sigma_p^{cm}, \quad (11)$$

где σ_p^{cm} – допускаемый предел прочности (в статике) при уплотнении почво-грунта, $\approx 0,11$ МПа.

Таким образом, конечная формула для определения тягового усилия на формирование в подпахотном горизонте дрены-кротовины радиусом r_{∂} :

$$R = \pi \cdot r_{\partial}^2 \cdot \left(\eta \cdot \frac{V_{\text{обп}} \cdot \sin \varphi}{r_1} + \sigma_p^{cm} \right) \cdot e^m \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha}, \quad (12)$$

Для аналитического решения уравнения (12) условно были заданы значения:

1) радиуса дренера r_d в диапазоне 0,04-0,06 м при скорости $V_{min} \approx 0,56$ м/с;

2) скорости V в диапазоне 2-6 км/ч (0,56-1,67 м/с) при минимальном значении радиуса дренера $r_d = |r_d|_{min} = 0,04$ м.

Решение уравнения (12) и анализ полученных данных показывают:

тяговое сопротивление дренера R существенно зависит от радиуса дренера r_d (квадрата радиуса r_d^2), по мере увеличения r_d в 1,5 раза сопротивление возрастает в 2,2 раза;

при возрастании скорости V МТА в 3 раза тяговое сопротивление R увеличивается всего на 5 %.

Список использованных источников

1. Пат. 2479969 РФ, МПК А01В13/08, А01В13/14. Глубокорыхлитель / В.И. Пындак, А.Е. Новиков, И.Б. Борисенко. – Оpubл. 27.04.2013. Бюл. №12.

2. Борисенко И.Б., Пындак В.И., Новиков А.Е. Развитие чизельных почвообрабатывающих орудий и их теоретическое обоснование // Машинно-Технологическая Станция. – 2012. – №3. – С. 16-20.

3. Пындак В.И., Новиков А.Е. Тяговое сопротивление чизельно-отвального орудия // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – №8. – С. 34-36.

4. Рейнер М. Реология / Пер. с англ. Н.И. Малинина; под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Наука, 1965. – 224с.

5. Краснолудский Н.В. Обоснование параметров вибрационного наконечника для проходки горизонтальных скважин способом прокола: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2010. – 158с.

6. Ешуткин Д.Н., Смирнов Ю.М., Цой В.И. [и др.]. Высокопроизводительные гидрорепневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций. – М.: Стройиздат, 1990. – 171с.

7. Ромакин Н.Е., Малкова И.В. Усилие внедрения и оптимальный угол заострения рабочего наконечника при статическом проколе грунта // Строительные и дорожные машины. – 2006. – №10. – С. 35-37.

УДК 631.61

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВКИ ОСУШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ С МАЛОМОЩНЫМ ПЛОДОРОДНЫМ СЛОЕМ ПОЧВЫ

О.Ф. Першина

ФГБНУ "ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова", г. Москва, Россия.

Реформирование в агропромышленном комплексе (АПК) России привело к значительным негативным изменениям на мелиорируемых землях. Отсутствие надлежащего ухода за мелиоративными системами ускорило процессы деградации осушенных земель и привело к массовому выходу их из сельскохозяйственного оборота. По данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации в России в неудовлетворительном состоянии находится около 1,4 млн. га осушенных сельскохозяйственных земель. Зна-

чительная часть земель переувлажнена из-за образования бессточных понижений площадью от 0,2 га до нескольких гектаров. В местах постоянного разворота техники возникают уплотненные понижения. Площадь таких поворотных полос достигает от 0,1 до 0,2 га на гектаре и эти участки обычно не используются для выращивания сельскохозяйственных культур. Для ускоренного восстановления продуктивности земель с переувлажненными понижениями и поворотных полос часто достаточно проведение таких работ, как глубокая первичная обработка почвы и тщательная планировка участков. Одним из наиболее эффективных приемов является планировка поверхности почвы. Первые исследования по влиянию планировки и выравнивания поверхности земель начались в 70-х годах прошлого столетия. Исследования проводились в Белоруссии и в России и показали, что указанные мероприятия повышают урожай вико-овсяной смеси на тяжелых почвах с 278 ц/га до 314 ц/га или на 13 %. В условиях Дальнего Востока выравнивание поверхности тяжелых почв на фоне глубокого рыхления повысило урожай кукурузы на 65 % [1]. После выравнивания поверхности всхожесть семян составила 68,4...73,3 % при 59,2 % на контроле. Урожай озимой пшеницы в одинаковых условиях на тяжелых почвах повысился с 29,4 ц/га до 33,7 ц/га (14,6 %), ячменя с 23 до 28 ц/га (21,7 %) и озимой ржи с 22,2 до 28 ц/га (26,1 %). Таким образом средняя прибавка зерновых от выравнивания поверхности почв (особенно тяжелых) составляет в среднем 3...4 ц/га [1].

Планировка поверхности мелиорируемых земель направлена на создание выровненных по рельефу и однородных по плодородию полей. В зависимости от площади вымочек и их состояния, глубины понижений проводят строительную или эксплуатационную планировку. На осушаемых землях строительную планировку поверхности полей по проектам, как правило, не проводят, только в составе культуртехнических работ выполняют засыпку понижений, ям, срезку отдельных повышенных мест и уполаживание косогоров. Эти работы обычно выполняют бульдозерами, скреперами, грейдерами. Но иногда образовавшиеся понижения и поворотные полосы бывают такой глубины, что для введения их в сельскохозяйственный оборот необходимо производить подсыпки привозным грунтом толщиной 20-30 см. Грунт доставляют на участки самосвалами, тракторными тележками или прицепными скреперами типа ДЗ-33А, ДЗ-111А с вместимостью ковша 3 и 4,5 м³, которые агрегируются с тракторами ДТ-75, Т-4А. Если осваиваемый участок расположен так, что доставка грунта возможна с объекта, находящегося на расстоянии до 100 м, то подсыпка понижений грунтом осуществляется бульдозерами ДЗ-42Г, ДЗ-130 на базе трактора кл.3; ДЗ-101А на тракторе кл.4 или ДЗ-48 на базе трактора кл.5.

В процессе использования мелиорируемых земель проводят эксплуатационную планировку полей для ликвидации борозд, гряд, гребней. При эксплуатационной планировке проводятся работы по выравниванию микро-рельефа участка или выравнивание поверхности поля после выполнения грубых планировочных работ. Эксплуатационная планировка выполняется

на площадях с неровностями микрорельефа не превышающими по ширине 20-25 м и по высоте 0,2...0,3 м длиннобазовыми планировщиками, планировщиками-выравнивателями и волокушами. Если почва уплотнена или засорена растительными остатками (например, стерней), проводят вспашку с оборотом пласта и боронованием, чтобы на поверхности не осталось дернины, растительных остатков и глыб. Ранее вспаханное поле дискуюют в два-три следа.

Работы по эксплуатационной планировке поверхности могут выполняться весной и осенью в зависимости от сроков посева сельскохозяйственных культур. Качество планировочных работ в значительной мере зависит от состояния почвенного слоя, его структуры и влажности. Влажность почв при планировочных работах должна быть не более (% массы абсолютно сухой почвы): 23...28 на глинистых, 22...25 на тяжелосуглинистых, 21..23 на среднесуглинистых, 15...17 на легкосуглинистых, 12...16 на супесчаных. Особенно тщательное выравнивание необходимо проводить под посев озимых зерновых культур, многолетних трав, при создании культурных лугов и пастбищ. При хорошо выровненной поверхности почвы устраняется опасность вымокания посевов, более равномерно распределяются атмосферные осадки, в 1,5-2 раза увеличивается поверхностный сток воды, улучшается работа осушительных систем и вводно-воздушный режим осушаемых почв.

Для выравнивания поверхности поля применяют длиннобазовые планировщики Д-719; ДЗ-602А; ДЗ-603АЛ; ПА-3 и планировщики-выравниватели ВПН-5,6А; ВП-8А, МВ-6,0. Выравнивание углов и других неудобных мест участка производится грейдерами-выравнивателями ГН-4; ГН-2,8. Планировщики с бездонным ковшом осуществляют планировку поверхности путем срезки грунта с повышений и засыпки понижений грунтом, образующимся в призме волочения. Планировщики-выравниватели перемещают грунт одним или несколькими разравнивающими отвалами, установленными перпендикулярно или под углом к направлению движения.

Схемы длиннобазовых планировщиков представлены на рисунках 1 и 2 [5]. Основные узлы этих планировщиков: рама, ковш, передок, механизм подъема и ходовые колеса.

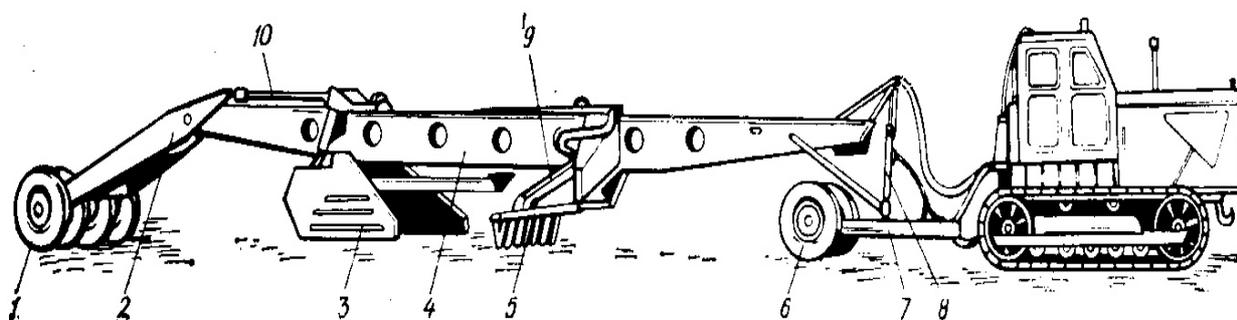


Рисунок 1 - Планировщик ДЗ-602А:

1- задние колеса; 2- задняя рама; 3- ковш; 4- передняя рама; 5- рыхлитель; 6- передние колеса; 7- дышло; 8, 9, 10 – гидроцилиндры

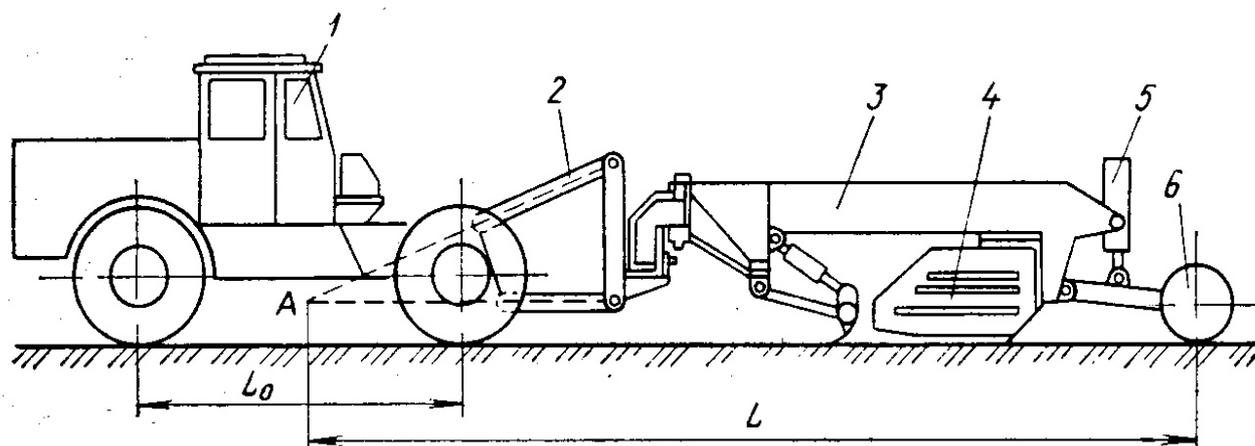


Рисунок 2 - Планировщик ДЗ-603АЛ:

1 - трактор, 2 - четырехзвенник; 3 - рама; 4 - ковш; 5 - гидроцилиндр; 6 - задние колеса

Планировщик ДЗ-602А является прицепной машиной к трактору класса 6-10. Передняя рама планировщика ДЗ-602А, шарнирно соединена с задней рамой, опирающейся на задние ходовые колеса. Задняя рама может поворачиваться при помощи гидроцилиндров, чем достигается изменение положения ковша в рабочем и транспортном положении. Планировщик ДЗ-603АЛ является полунавесным к колесному трактору класса 5. Навеска обеспечивает статическую определенность системы и возможность перемещаться по неровностям поля, опираясь на ходовые колеса.

Выравниватель ВПН-5,6 является двухсекционным навесным орудием с шириной захвата 5,6 м, агрегируется с трактором ДТ-75ВМ. В односекционном варианте имеет ширину захвата 2,8 м и агрегируется с трактором МТЗ-82. Выравниватель ВП-8 является прицепным трехсекционным орудием, оборудованным боронами и агрегируется с тракторами класса 3...4. В процессе работы планировочных агрегатов почва уплотняется. Уплотнение подпахотного слоя почвы приводит к ухудшению водно-физических свойств, температурного режима почвы и как следствие снижению урожая сельскохозяйственных культур. Основным приемом по ликвидации переуплотнения подпахотного слоя почвы является его разрыхление. На длинноразные планировщики впереди ножа устанавливаются батареи тяжелых дисковых борон, что позволяет выполнять разрыхление одновременно с выравниванием поверхности почвы, что значительно улучшает качество выравнивания поверхности участка. Технические характеристики планировщиков и выравнивателей приведены в таблице 1.

Перед началом работы планировщика на ровной поверхности устанавливают положение ножа или ковша планировщика по высоте. На рыхлой почве (при первом следе планировки) нож устанавливается на 3-5 см ниже опорной поверхности колес, при уплотненной почве (после первого следа агрегата) нож опускают до опорной плоскости колес. Такая регулировка высоты ножа исключает срезку грунта на ровных участках и переполнение ковша.

Таблица 1 - Технические характеристики машин для выравнивания и планировки мелиорируемых земель

Показатели	Планировщики		
	ДЗ-602	ДЗ-603АЛ	ПА-3
Агрегатируется с трактором	Т-170; Т-10М	К-701; К-3000АТМ	ДТ-75
Тип агрегатирования	прицепной	полунавесной	прицепной
Ширина захвата, м	4,0	4,0	3,05
Длина базы машины в рабочем положении, м	12	12	11,12
Тип рабочего органа	Ковш бездонный		
Наличие рыхлителя	да	да	нет
Производительность в один след, га/ч	1,2...1,7	2,1...2,7	1,2
Показатели	Выравниватели		
	ВПН-5,6	ВП-8	МВ-6
Агрегатируется с трактором	ДТ-75; ХТЗ-150-09	ДТ-75; ХТЗ-150-09	ДТ-75; ХТЗ-150-09
Тип агрегатирования	навесной	прицепной	прицепной
Ширина захвата, м	5,6	8,0 и 6,0	6,0
Производительность, га/ч	3,1	4,8	4,2

Положение ковша контролирует тракторист со своего рабочего места по масштабной рейке – указателю, укрепленной на передке планировщика. Глубину копания во время планировки изменяют с помощью гидроцилиндра.

С появлением лазерных систем управления (САУ) планировщики могут оснащаться этими системами, что позволит выполнять планировку более точно. [3]. В настоящее время на планировке орошаемых земель успешно работают короткобазовые планировщики ПЛ-5, ПАУ-1, ПАУ-2, ПАУ-3,6, ПАУ-4,2РЦ, разработанные ОАО ИЦ «Луч» [3]. Эти планировщики оснащаются лазерной системой управления, что обеспечивает выравнивание поверхности земли под плоскость с наибольшей точностью $\pm 2...3$ см. Короткобазовые планировщики эффективно работают на разрыхленных грунтах и не могут использоваться на плотных грунтах. Короткобазовые планировщики более маневренные, что уменьшает радиус поворота, имеют малую металлоемкость и более низкое удельное давление на грунт. Планировщик ПАУ-2 в работе представлен на рисунке 3. Технические характеристики короткобазовых планировщиков приведены в таблице 2.



Рисунок 3 - Планировщик ПАУ-2 с лазерной системой в работе [3]

Таблица 2 - Технические характеристики короткобазовых планировщиков [3]

Наименование характеристик	Модель планировщика		
	ПЛ-5	ПАУ-1	ПАУ-2 (ПАУ-3,6)
Базовый трактор	Т-170 К-701	Т-75; Т-170; Т-150; К-701	К-701; Т-150
Тип навесного оборудования	полуприцепной		
Тип ковша	бездонный		
Длина базы, м:			
- в транспортном положении	5,7	5,27	6,25
- в рабочем положении	8,0	5,29	6,05
Ширина захвата, м	4; 5	2,4;3,6;4,8	4,2; (3,6)
Толщина срезки, см	до 10		
Рабочие скорости, км/ч	до 15		
Масса, кг	3250	3000	3900
Точность планировки с ЛСАУ, см	± 3		

В зависимости от конфигурации участка и особенности микрорельефа схема движения планировочных агрегатов может быть диагонально-перекрестной или загонной (рис. 4). Диагонально-перекрестное движение рекомендуется на участках, где необходимо выравживание микрорельефа в несколько следов. При такой схеме поле разбивают на квадратные участки. Почва выравняется в каждом загоне отдельно. Линию первого прохода прокладывают по диагонали участка, последующие проходы делают рядом с первым. Загонный способ движения агрегата целесообразен на участках с высотой неровностей до 8...10 см и на узких участках. Поле разбивается на загоны шириной 20-25 м, чтобы размер их был кратным ширине захвата планировщика. Первый проход агрегат делает по границе контура, второй – обратном направлении через 25-30 м, третий – внутри выделенного загона

вдоль линии первого прохода, четвертый – вдоль второго и т.д. Таким образом, планируется участок по двум загонам. При проходе планировщика вдоль смежной полосы необходимо предусматривать ее перекрытие на 20-30 см. На контурах неправильной формы применяют перекрестно-загонный способ движения планировочных агрегатов. [5].

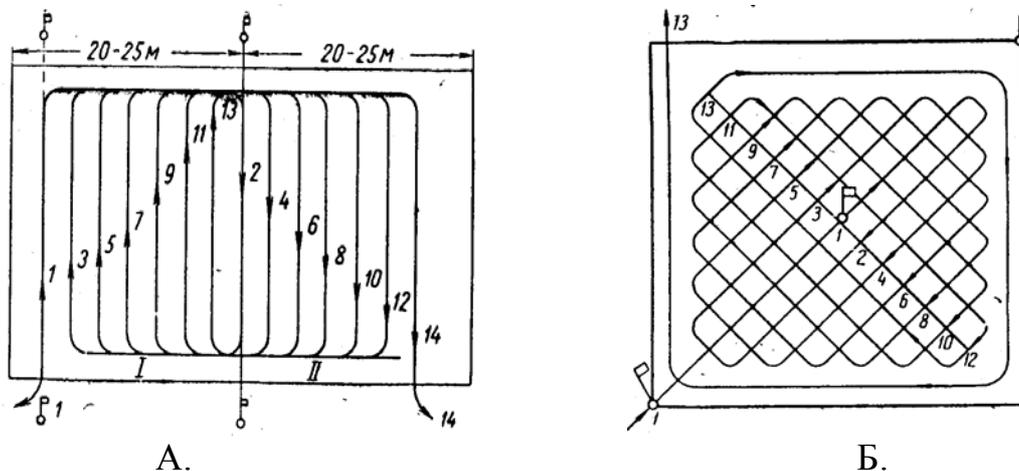


Рисунок 4 - Схема планировки участка:

А- при загонном способе движения планировщика;

Б- при диагонально-перекрестном способе движения планировщика.

I, II – загоны; 1- заезд на участок; 1-14 – очередные проходы планировщика

После планировки по вышеуказанным схемам необходим проход планировочного агрегата вдоль контура по разворотным полосам.

Экспериментальные исследования, выполненные ВНИИГиМ, БелНИИМВХ, ЛитНИИГиМ показали, что наибольшую планирующую способность планировщики имеют при первом проходе [4, 6]. С увеличением числа проходов эффект выравнивания растет незначительно. Исследования ВНИИГиМ показали, что после второго прохода планировщика эффект выравнивания от планировки уменьшается в 1,6...1,7 раза по сравнению с первым проходом, после третьего – в 2...2,3, после четвертого – в 2,5...3,9 раза. При этом для планировщиков с большей длиной базы снижение эффекта сглаживания с каждым проходом более заметно. Полученные данные о соотношении протяженности неровностей показали, что при многопроходной работе доля длинных неровностей на поле возрастает, а коротких – уменьшается, что и является основной причиной снижения эффекта планировки с каждым проходом, так как планировщик длинные неровности выравнивает значительно хуже коротких. Данные о соотношении протяженности неровностей при многопроходной работе планировщиков показаны в таблице 3 [4]. Согласно исследованиям ВНИИГиМ планировку целесообразно производить в один-два прохода планировщика.

Таблица 3 - Планирующая способность длиннобазовых планировщиков [4]

Интервалы протяженности неровностей, м	Оставшиеся неровности после прохода планировщика, %		
	первого	второго	третьего
0-10	48,1	35,4	28,9
>10-20	65,0	33,5	35,9
>20-30	82,6	43,8	37,6
>30-40	75,0	75,0	87,7
40	81,8	63,7	94,0

Для окончательной планировки неровностей, оставшихся после прохода длиннобазовых планировщиков, целесообразно использовать широкозахватные планировщики-выравниватели, тем самым исключая многократные проходы ходовых колес и рабочих органов планирующих машин и снижая разрушение структуры почвы. При выравнивании поверхности почвы полностью или частично срезается гумусовый слой, которым засыпаются микропонижения. Такое перераспределение плодородного слоя изменяет в микроразонах рельефа физические, водно-воздушные свойства почвы, урожайность сельскохозяйственных культур. По данным исследований СевНИИГиМ, срезка гумусового слоя до 5см существенно не влияла на снижение урожая. При срезке до 10 см урожайность снизилась на 6%, при срезке 15 см и 20 см – соответственно на 16 и 24%. Внесение органических и минеральных удобрений в сочетании с известкованием улучшает водно-воздушный и пищевой режимы почвы и полностью снимает отрицательное действие срезки на урожайность сельскохозяйственных культур. Минимальные дозы органических удобрений, необходимые для ликвидации отрицательного влияния срезки плодородного слоя почвы на урожай зерновых, пропашных и многолетних трав представлены в таблице 4. Более высокие дозы удобрений, не увеличивая существенно урожайность, способствуют восстановлению почвенного плодородия [2].

Таблица 4 - Оптимальные дозы (т на 1 см срезки) внесения органических удобрений в зависимости от глубины срезки [2]

Глубина срезки, см	Для компенсации снижения урожайности			Для восстановления почвенного плодородия		
	пропашных	зерновых	многолетних трав	общий азот	фосфор	калий
5	4	2	2	6	6	4
10	6	2	4	8	10	8
15	8	4	6	12	12	10

Исследованиями установлено, что при срезке гумусового слоя на 25; 50 и 75% исходной мощности в местах срезки необходимо вносить компоста соответственно 20; 40 и 60 т/га [2].

Таким образом, полученные результаты на основании исследований позволяют сделать следующие выводы:

- при проведении планировочных работ на минеральных землях нельзя допускать срезку более половины величины гумусового слоя, чтобы не обнажить подстилающие горизонты;

- выравнивание поверхности мелиорируемых земель длиннобазовыми планировщиками следует проводить за два прохода планирующего агрегата при скорости его движения 7...9 км/ч;

- при планировке срез пахотного слоя почвы за один приём не должен превышать 5 см на полях с низким содержанием гумуса в почве (2...3%)

- после планировки необходимо внести повышенные дозы органических и минеральных удобрений;

- для окончательной планировки неровностей, оставшихся после работы планировщиков, а также для ликвидации мелких впадин и возвышений на поверхности поля в результате обработки почвы и проходов техники целесообразно использовать широкозахватные планировщики-выравниватели.

С учетом требований по выравниванию микрорельефа (поверхность поля считается выравненной, если на участке длиной 4 м отклонения не превышают ± 5 см) и на основании исследований ЛитНИИГиМ и СевНИИГиМ, а также исходя из мощности плодородного слоя и выраженности микрорельефа технологические схемы и применяемый комплекс машин для планировки осушаемых земель должны подбираться следующим образом:

- при толщине плодородного слоя до 5 см планировку проводят только широкозахватными планировщиками-выравнивателями с двухкратным проходом;

- при толщине плодородного слоя 5-15 см планировку осуществляют одним проходом длинобазового планировщика в сочетании с 1-2 проходами широкозахватного планировщика-выравнивателя;

- при толщине плодородного слоя 15-25 см планировку выполняют двумя проходами длинобазового планировщика и одним проходом широкозахватного планировщика-выравнивателя;

- при более мощном плодородном слое применение планирующих орудий не ограничивается.

Включение в технологический процесс планировки земель с маломощным плодородным слоем почвы широкозахватных планировщиков-выравнивателей позволит до минимума снизить отрицательное воздействие планирующих орудий на структуру почвы.