

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ БИОТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ОТ АЗОТА И ФОСФОРА НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ КАНАЛИЗАЦИИ

Н.Ю. Большаков,
к.т.н., доцент, ведущий
специалист GSP-Project Ltd
г. Санкт-Петербург, Россия

Среди различных методов удаления азота и фосфора наиболее предпочтительны с экономической точки зрения биологические методы. Однако в традиционных системах биологической очистки, работающих в режиме нитрификации, азот и фосфор удаляются на 10÷30%, что не позволяет обеспечить норматив НДС. Увеличения эффективности очистки до 70÷90% можно добиться, если использовать биотехнологии нитриденитрификации (НД) и биологической дефосфотации (БДФ). Качество воды, очищенной по этим биотехнологиям, отвечает требованиям на сброс для водоемов рыбохозяйственной категории водопользования. Одновременно достигается эффективная очистка от органических веществ и сокращение расхода воздуха на аэрацию.

Реализация биотехнологий НД и БДФ связана с созданием в аэротенке трех типов зон:

- аэробная зона (высокая концентрация растворенного кислорода), где протекают процессы аэробной очистки от органических веществ, нитрификация (биоокисление аммонийного азота до нитратного) и дефосфотация (быстрое потребление фосфатов фосфорными бактериями);
- аноксидная зона (растворенный кислород практически отсутствует, но есть нитраты, а также органические вещества), где происходит процесс денитрификации;
- анаэробная зона (нет растворенного кислорода, нет ни-

тратов и нитритов, но есть органические вещества), где идет сбраживание органических веществ до ацетата, который потребляется фосфорными бактериями с выделением в среду фосфатов.

Аноксидные и анаэробные условия создаются замедленной аэрацией на механическое перемешивание. Однако для действующих очистных сооружений такая реконструкция аэротенков требует значительных капитальных затрат, связанных с большим объемом строительно-монтажных работ и высокой стоимостью импортных перемешивающих устройств (аналогичное отечественное оборудование отсутствует). Альтернативный подход состоит в создании аноксидных условий в аэротенке за счет низкой (минимально допустимой для предотвращения осаждения активного ила) интенсивности аэрации. Наши исследования свидетельствуют также о возможности создания в зонах с низкой интенсивностью аэрации псевдоанаэробных условий (без O_2 и без NO_3^-), влекущих развитие процесса биологической дефосфотации.

Для существующих аэротенков, работающих в традиционном аэробном режиме, внедрение биотехнологий НД и БДФ при сохранении производительности по стокам требует интенсификации аэробной очистки. Повышение скорости аэробных процессов, включая нитрификацию и биоокисление органических веществ, позволяет сократить объем аэробной зоны с выделением в аэротенке аноксидных и анаэробных зон. Интенсификация аэробной очистки достигается применением эффективных

аэраторов и созданием в аэротенке широкой аэрируемой полосы. Решение вопроса о возможности перевода существующего аэротенка в режим НД и БДФ, а также выбор оптимальной схемы его работы, требует применения методов математического моделирования. С этой целью автором разработана математическая модель, основные положения которой рассмотрены ниже.

Удаление из стоков аммонийного азота обусловлено двумя биологическими процессами: потреблением азота на синтез биомассы и биоокислением при нитрификации. Кроме того, в результате проведенных исследований выявлено существенное вторичное загрязнение воды аммонийным азотом, протекающее как в аэротенке, так и во вторичном отстойнике [1, 2]: органический азот, содержащийся во взвешенных веществах сточной воды и биомассе активного ила, в ходе их биодеструкции выходит в раствор в виде аммонийного азота.

Скорость биоокисления аммонийного азота определяется 1-ой стадией нитрификации и может быть выражена через удельную скорость роста (μ_{mN}) бактерий-нитрификаторов рода *Nitrosomonas*:

$$V_N = -\frac{dC_N}{dt} = \frac{\mu_{mN} 1.07^{T-20} C_N C_o}{(k_N + C_N)(k_o + C_o)} \times \frac{X \Delta N_n}{\Delta X}$$

где μ_{mN} - максимальная удельная скорость роста нитрификаторов при 20°C; C_N , C_o - концентрации аммонийного азота и растворенного кислорода; k_N , k_o - константы Моно (полунасыщения) для процесса нитрификации; X , ΔX - концентрация активного ила в аэротенке и его прирост на 1 л сточной воды; ΔN_n - количество ни-

трифицированного азота на 1 л сточной воды; T - температура иловой смеси в аэротенке ($^{\circ}\text{C}$).

Скорость вторичного загрязнения воды аммонийным азотом в аэротенке (V_{Nox}) связана со скоростью биораспада (самоокисления) активного ила (V_{ox}), которую можно выразить через его возраст:

$$V_{\text{Nox}} = \alpha_N V_{\text{ox}}$$

$$V_{\text{ox}} \cong bX \frac{y_0 L_{\text{en}} + B_{\text{en}}(1 - f_B)}{y_0 L_{\text{en}}(1 + f_B \tau_x) + B_{\text{en}}(1 + f_B b \tau_x)}$$

где a_N - массовая доля азота в биodeградируемых (окисляемых) органических веществах активного ила (зависит от доли биомассы в активном иле и в среднем $a_N = 0,08$); b - константа скорости самоокисления биомассы ($b = 0,2 \times 1,07^{T-20}$, сут. $^{-1}$).

В зонах нитрификации обычно обеспечивают гидродинамический режим, близкий к идеальному вытеснению, при котором эффективность нитрификации выше, чем в режиме смешения. Для нитрификатора-вытеснителя получим:

$$- \frac{dC_N}{dt} = V_N - V_{\text{Nox}}$$

Решение этого уравнения, при условии эффективной очистки от аммонийного азота ($C_{\text{Nen}} \gg C_{\text{Nex}}$), а также с учетом соотношений:

$$\frac{\tau}{\tau_x} = \frac{\Delta X}{X} = \frac{y_0 L_{\text{en}}(1 + f_B \tau_x) + B_{\text{en}}(1 + f_B b \tau_x)}{X(1 + b \tau_x)}$$

можно представить в виде:

$$C_{\text{Nex}} = \frac{\alpha_N b K_N [y_0 L_{\text{en}} + B_{\text{en}}(1 - f_B)]}{\mu_{\text{mN}} C_{\text{Nen}}(1 + b \tau_x)} + \frac{C_{\text{Nen}}}{1 + r} \exp \left[- \frac{(\mu_{\text{mN}} \tau_x \frac{\tau}{\tau_x} - 1) C_{\text{Nen}}}{(1 + r) K_N} \right] \quad (1)$$

где τ , τ_x - время пребывания сточной воды во всем аэротенке и в зоне нитрифика-

ции соответственно ($\tau = V_a/Q$, $\tau = V_N/Q$); r - коэффициент рециркуляции;

$$\mu_{\text{mN}}^* = \frac{\mu_{\text{mN}} C_O}{K_O + C_O}$$

Как следует из уравнения (1), с увеличением возраста ила τ_x концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка (C_{Nex}) стремится к нулю. Расчеты показывают, что при температуре 20°C и типичных значениях параметров ($\mu_{\text{mN}} = 0,4$ сут. $^{-1}$, $C_O = 3$ мг/л, $K_O = 1$ мг/л, $y_0 = 0,5$ г/г БПК $_n$, $r = 1$, $L_{\text{en}} = 100$ мг/л, $B_{\text{en}} = 80$ мг/л, $C_{\text{Nen}} = 15$ мг/л, $\tau_N/\tau_{\text{en}} = 0,65$, значения остальных параметров приведены выше) концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка-вытеснителя достигает 0,39 мг/л (ПДК для водоемов рыбохозяйственной категории водопользования) уже при возрасте активного ила 5 суток, а при $\tau_x = 10$ сут., $C_{\text{Nex}} = 0,11$ мг/л. Эти расчеты подтверждаются фактически данными работы аэротенков. Так, на выходе аэротенков Юго-Западных очистных сооружений г. С.-Петербурга, при $C_O \geq 3$ мг/л и возрасте ила 10-12 суток, достигались выходные концентрации аммонийного азота около 0,3 мг/л.

Однако на выходе всей системы биологической очистки, включающей аэротенк и вторичный отстойник, концентрация аммонийного азота может быть существенно выше, чем на выходе аэротенка. В радиальных отстойниках, оборудованных илоскребами, перемещение осадка к центральному приемку влечет его перемешивание и возникновение турбулентного переноса растворенных примесей из зоны осадка в зону осветленной воды. Результатом является существенное (на уровне нескольких ПДК) вторичное загрязнение сточной воды аммонийным азотом, выделяющимся из активного ила в ходе его биораспада в зоне

осадка вторичного отстойника.

Моделирование процессов во вторичном отстойнике и данные натурных исследований свидетельствуют о возможности сокращения вторичного загрязнения с достижением на выходе системы «аэротенк-вторичный отстойник» концентрации аммонийного азота в пределах ПДК. Наиболее эффективными мерами являются повышение концентрации кислорода в потоке иловой смеси, поступающей во вторичный отстойник, а также уменьшение в нем уровня осадка. Повышение концентрации кислорода на выходе аэротенка (входе вторичного отстойника) решает также задачу глубокой очистки от нитритного азота (до уровня ПДК, составляющего 0,02 мгN/л).

Поступление нитритов со сточными водами незначительно. В аэротенках нитриты могут образовываться из аммонийного азота как продукт первой стадии нитрификации, если вторая стадия (биоокисление нитритов до нитратов) лимитирована по кислороду. Лимитирование практически снимается при концентрации растворенного кислорода 3 мг/л. Поэтому достижение на выходе аэротенка концентрации нитритного азота не более 0,02 мг/л обеспечивается поддержанием концентрации растворенного кислорода не менее 3 мг/л в выходной зоне аэротенка-вытеснителя. При этом условии, вторичного загрязнения нитритами во вторичных отстойниках практически нет, соответственно обеспечивается самый жесткий норматив НДС по нитритному азоту.

Если включить в схему биологической очистки дополнительную аноксидную зону, то параллельно с процессом нитрификации будет происходить процесс денитрификации – биовосстановления ни-

тритного и нитратного азота в азот молекулярный, отдаваемый при аэрации в атмосферу. На стадии денитрификации биовосстановление органических веществ осуществляется не кислородом, а нитратами, что позволяет сократить расход аэрирующего воздуха и затраты на аэрацию. По окислительной способности 1 г нитратного азота эквивалентен 2,86 г молекулярного кислорода. Аноксидные зоны одновременно с биовосстановлением нитратов служат для частичной очистки от органических веществ. Расход внешнего окислителя органических веществ в аноксидных зонах, куда, как правило, подается исходная сточная вода, в единицах молекулярного кислорода составляет $0,6 \div 0,8 \text{ г O}_2/\text{г}$ снятого БПК_п, что соответствует расходу азота нитратов в количестве $0,2 \div 0,3 \text{ г N/г}$ БПК_п, т. е. для удаления 1 г нитратного азота требуется $3 \div 5 \text{ г}$ БПК_п. На практике возможны два варианта устройства зон денитрификации: с аэрацией и без аэрации. В зонах денитрификации, создаваемых за счет низкой интенсивности аэрации, снижение концентрации растворенного кислорода до величины $0,1 \text{ мг O}_2/\text{л}$ достигается потреблением кислорода облигатными аэробами (в частности, бактериями-

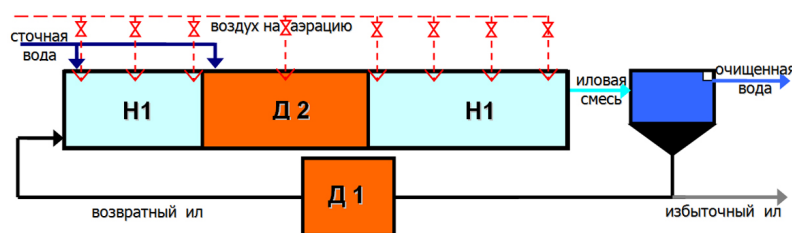


Рис. 1. Технология нитриденитрификации в системе аэротенк-вторичный отстойник городских очистных сооружений производительностью 20 000 м³/сут.

нитрификаторами) и частью гетеротрофов. Чем выше скорость дыхания клеток (интенсивность энергетического обмена), тем легче достигнуть условий, близких к аноксидным, и обеспечить высокую скорость денитрификации. С уменьшением концентрации легкоокисляемых (растворенных) органических веществ и снижением температуры скорость дыхания падает, что требует существенного уменьшения интенсивности аэрации в зонах денитрификации (до $1,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$). Рассмотренный выше подход использован при реконструкции системы биологической очистки аэротенк-вторичный отстойник канализационных очистных сооружений производительностью 20 000 м³/сут. До реконструкции аэротенк работал в традиционном режиме аэробной биологической очистки со среднепузырчатой аэрацией. Для перевода аэротенка в ре-

жим НД выделены зоны нитрификации и зоны денитрификации. Реализованная технология нитриденитрификации в системе аэротенк-вторичный отстойник городских очистных сооружений производительностью 20 000 м³/сут. показана на рис. 1. В зонах нитрификации созданы строго аэробные условия (концентрация растворенного кислорода более 3 мг/л), необходимые для эффективного биоокисления аммонийного азота. В зонах денитрификации достигнуты псевдоаноксидные условия (концентрация растворенного кислорода не более 0,1 мг/л), обеспечивающие протекание процесса биовосстановления нитратного азота до молекулярного.

Для эффективного протекания процесса денитрификации организована рассредоточенная подача сточной воды: подача сточной воды осуществляется в начало второго и третьего коридоров. В начало второ-

Таблица 1. Эффективность очистки от азота в аэротенке до и после перехода на технологию нитриденитрификации (разовые пробы)

Применяемая технология	Концентрация, мг/л						ЭОамм, %	ЭОмин, %
	Вход (канал сточной воды аэротенка)			Выход (канал иловой смеси)				
	N-NH_4^+	N-NO_3^-	$\text{N}_{\text{мин}}^*$	N-NH_4^+	N-NO_3^-	$\text{N}_{\text{мин}}^*$		
Традиционная технология	27,8	1,17	28,97	0,96	16,9	17,86	96,5	38,4
Технология нитри-денитрификации	28,0	0,39	28,39	0,33	2,5	2,83	98,8	90,0

*Примечание: без учета азота нитритов

Таблица 2. Эффективность очистки от азота на очистных сооружениях до и после перехода на технологию нитриденитрификации (среднесуточные пробы)

Применяемая технология	Концентрация в очищенной воде (выход очистных сооружений), мг/л						
	$N-NH_4^+$	$N-NO_2^-$	$N-NO_3^-$	$N_{неорг}$	Взвеш. вещ-ва	$N_{орг}^*$	$N_{общ}$
Традиционная технология	2,5	0,21	13,1	15,8	5,3	1,06	16,86
Технология нитриденитрификации	0,18	0,05	5,9	6,13	<3	0,6	6,73

*Примечание: концентрация органического азота получена расчетом

го коридора подается 70÷80 % сточной воды, в начало третьего коридора – 20÷30 %.

Достигнутые после перевода аэротенка очистных сооружений в режим нитриденитрификации результаты иллюстрируют табл. 1 и табл. 2. В табл. 1 приведены данные по эффективности очистки от азота в аэротенке до и после внедрения новой технологии очистки. Для оценки эффективности работы аэротенка по традиционной технологии очистки до проведения каких-либо изменений были отобраны пробы поступающей и очищенной в аэротенке сточной воды. Результаты проведенного анализа проб приведены в строке «традиционная технология». Из табл. 1 следует: после внедрения технологии нитриденитрификации, эффективность биологического удаления азота составила 90%, т.е. обеспечена практически максимально возможная эффективность процесса нитриденитрификации.

В табл. 2 проведено сравнение эффективности очистки от азота в целом на очистных сооружениях. Для оценки эффективности работы аэротенка по традиционной технологии очистки использованы эксплуатационные данные работы очистных сооружений в период с января по июнь 2009 г. (табл. 1). Данные табл. 2 иллюстрирует рис. 2. Как следует из табл. 2, при реализации технологии нитриденитрификации, эффективность удаления взвешенных веществ не снизилась: концентрация взвешенных веществ в очищенной воде < 3 мг/л, что даже несколько ниже концентрации взвешенных веществ в очищенной воде до реализации рекомендаций (5,3 мг/л). Эффективность удаления фосфора после перехода на технологию нитриденитрификации также не снизилась, см. табл. 3.

Внедрение технологии нитриденитрификации позволило не только снять лимитиро-

вание процесса нитрификации по растворенному кислороду, но и перейти на воздушную меньшую производительности. До перехода на технологию нитриденитрификации использовался турбокомпрессор ТВ-175-1,6-01, после перехода стало возможным использование воздушной ТВ-80-1,6-01. При ставке платы за потребляемую электроэнергию 1,59 руб./кВт, экономический результат для предприятия составил более 1,25 млн. руб./год. С учетом снижения платы за сброс биогенов, реальный экономический результат оказывается еще выше. Аналогичные результаты получены на других предприятиях: достигнуто существенное сокращение сброса соединений азота, существенно снижены эксплуатационные расходы на потребляемую очистными сооружениями электроэнергию.

В традиционном процессе биологической очистки, изымающийся из сточной воды

Таблица 3. Эффективность очистки от фосфора фосфатов в целом по очистным сооружениям

	Концентрация фосфора фосфатов, мг/л								
	До						После		
	I год			II год			III год		
	вход	выход	съём	вход	выход	съём	вход	выход	съём
Среднее	2,6	2,8	-0,2	2,4	2,7	-0,3	3,65	1,9	1,75
ЭО, %	-7,7			-12,5			47,9		

*Примечание: ЭО – эффективность очистки.

фосфор идет на построение клеточного вещества активного ила, фосфаты используются для обеспечения энергетических потребностей клеток. Поэтому рост потребления фосфора может быть достигнут в процессе биологической очистки сточных вод с повышенным приростом ила. Однако при традиционном режиме биологической очистки возможность увеличения прироста ила ограничена. Повышение прироста ила в системе аэротенк – вторичный отстойник достигается за счет снижения концентрации активного ила и его возраста. Результат – снижение эффективности очистки по БПК и азоту (в случае наличия схем нитриденитрификации). Поэтому при эксплуатации очистных сооружений в традиционном режиме можно достичь лишь незначительного изъятия фосфора фосфатов и не удастся обеспечить требованиям норматива ПДС, наряду с ухудшением очистки по остальным показателям. Для глубокого изъятия фосфора по технологии биологической дефосфотации осуществляют модификацию процесса путем включения ступени анаэробной обработки активного ила в традиционную схему. В этом случае в системе биологической очистки создаются условия, когда активный ил поочередно проходит анаэробную и аэробную зоны, что стимулирует развитие в нем фосфорных бактерий, относящихся к факультативным анаэробам.

В анаэробной зоне не фосфорные гетеротрофные бактерии сбраживают органические вещества (преимущественно взвешенные) до ацетата, являющегося субстратом фосфорных бактерий. Фосфорные бактерии потребляют ацетат и синтезируют из него поли-гидроксibuтират (PHB), используя для синтеза энергию,

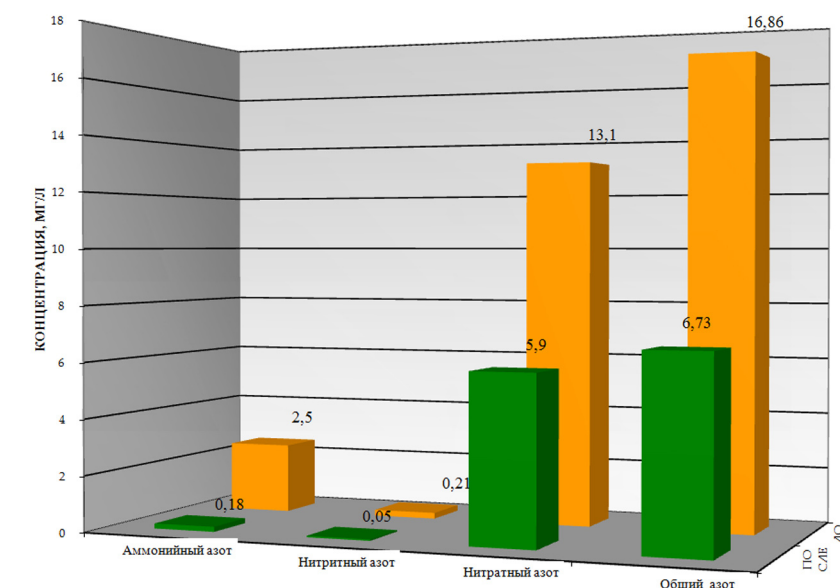


Рис. 2. Увеличение эффективности очистки по азоту на городских очистных сооружениях производительностью 20 000 м³/сут.

выделяющуюся при гидролизе клеточных полифосфатов. Образующиеся при гидролизе полифосфатов ортофосфаты выделяются в среду. Поэтому для успешного применения этой биотехнологии недопустимо длительное пребывание активного ила в бескислородных условиях на стадиях его обработки во избежание выхода фосфора из клеток в раствор и его возврата на вход очистных сооружений.

В аэробных условиях фосфорные бактерии синтезируют биомассу, используя в качестве источника углерода РНВ, запасенный в анаэробных условиях. РНВ одновременно служит энергетическим субстратом: часть его окисляется молекулярным кислородом (до CO_2 и H_2O), а выделяющаяся энергия идет на синтез АТФ и полифосфатов. Энергия АТФ сразу используется на синтез биомассы (АТФ гидролизуются до АДФ), а полифосфаты запасаются в клетках в виде гранул, что и обеспечивает высокое потребление фосфора из среды (сточной воды).

Существует мнение, что с

уменьшением возраста эффективности БДФ возрастает в соответствии с увеличением прироста ила. Т.к. технология НД при низком возрасте не работает, то важной задачей является выявление значений возраста активного ила, при котором совместное применение технологий НД и БДФ дает наилучший результат. С этой целью автором выполнен теоретический анализ и экспериментальные исследования с целью определения влияния возраста активного ила на процесс БДФ. Согласно полученным экспериментальным данным [1], оптимальное значение возраста, где скорость образования ацетата и эффективность удаления фосфора достигают наибольших значений лежат в диапазоне 6–11 сут. Этот диапазон соответствует и наибольшей эффективности технологии нитриденитрификации, что подтверждает целесообразность совмещения этих биотехнологий для эффективной очистки от азота и фосфора. Как следует из результатов исследований, применение технологии БДФ при возрасте ме-

нее 4÷5 сут. (в условиях отсутствия нитрификации) малоэффективно.

На практике необходимо учитывать, что при реализации технологии БДФ на действующих очистных сооружениях требуется порядка 1÷2 час. пребывания сточной воды в анаэробной зоне или $1/4 \div 1/6$ от объема всего аэротенка. Внедрение анаэробных зон приводит к сокращению объема аэробных зон, а следовательно снижается эффективность очистки по БПК и азоту. Поэтому за рубежом при внедрении данных технологий в существующих аэротенках предусматривается ~20%-ое снижение гидравлической нагрузки на очистные сооружения [3]. Однако, в большинстве случаев этого можно избежать, если одновременно с реализацией технологии биологической дефосфо-

тации осуществлять интенсификацию процесса биологической очистки в аэробных зонах. Интенсификацию следует проводить в нескольких направлениях:

- в направлении повышения эффективности системы аэрации;
- при помощи дополнительного секционирования (если аэротенк работает в промежуточном режиме между вытеснением и смешением) с целью приближения гидродинамического режима к режиму вытеснения, при котором происходит более эффективное удаление аммонийного азота;
- за счет оптимизации процесса биологической очистки на основе методов математического моделирования.

Выводы:

1. Расчеты по разработан-

ной модели и достигнутые на практике результаты позволяют заключить, что существует реальная возможность обеспечения норматива НДС по азоту и фосфору путем внедрения в существующих аэротенках технологий нитриденитрификации и биологической дефосфотации без сокращения производительности и эффекта очистки по остальным показателям сточных вод.

2. Внедрение технологии нитриденитрификации позволило сократить сброс общего азота в 2,5 раза, без сокращения эффективности очистки по другим показателям. За счет сокращения энергопотребления экономический результат от реализации новой технологии составил более 1,25 млн. руб./год (без учета сокращения платы за сброс).

ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков Н.Ю. Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 112 с.
2. Николаев А.Н., Большаков Н.Ю. Биологическая очистка сточных вод: математическая модель. – Экология и промышленность России, ноябрь 2001. – с. 13-16.
3. George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. – New York.: McGraw-Hill Higher Education, 2003. – 1819 p.

ПЛАНИРУЕТСЯ СТРОИТЕЛЬСТВО 30 ВОДОХРАНИЛИЩ

В Казахстане будут построены 30 водохранилищ для сбора паводковых вод. Об этом журналистам на конференции в Астане сообщил заместитель председателя Комитета водных ресурсов Министерства окружающей среды и водных ресурсов РК Болат Бекнияз.

По его словам, проект, осуществляемый в рамках госпрограммы по управлению водными ресурсами, поможет «убить двух зайцев сразу» – обезопасить жителей от разрушительных паводков и обеспечить регион поливной водой в летнее время.

«Там, где были регулируемые водохранилища, которые находятся в государственной собственности, практически никаких ЧС не было, потому что мы регулируем эту воду посредством строительства водохранилищ и гидроузлов. А там, где их нет, – это уже зависит от природы. Допустим, по реке Урал у нас практически нет водохранилищ, мы не можем регулировать паводковую воду. Эта вода, можно сказать, в весенний период большими объемами уходит в соседнюю страну. Почему бы нам не аккумулировать эту воду на территории Казахстана и потом ее использовать в летнее время», – сказал Болат Бекнияз.

По его словам, на сегодня были проанализированы регионы, где необходимы такие сооружения.

«Мы согласовали с каждой областью, проехали по регионам, посмотрели места, где возможно построить эти водохранилища. Получается, порядка 30 новых водохранилищ разных объемов мы можем построить на территории Казахстана», – пояснил Болат Бекнияз.

По его словам, реализация проекта потребует до 1 миллиарда тенге и более в зависимости от объема водохранилищ.

Источник: ИА «КАЗИНФОРМ»