

УДК 621.315.592

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ И НАДЁЖНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

М.А. Жалелов - кандидат физика-математических наук

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

К.А.Исманлов - доктор физико-математических наук, профессор

Г.Р.Абдиреймова – студент 2-курса

М.Аскарлов - магистрант

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Таянч сўзлар: яримўтказгичли асбоблар, механик кучланиш, нуксонлар.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, механическое напряжение, дефекты.

Key words: semiconductor devices, mechanical stress, defects.

Согласно литературным данным [1-4] требования к надёжности современных полупроводниковых приборов ужесточаются с каждым годом. Как правило надёжность готовых полупроводниковых приборов определяется прежде всего надёжностью составляющих его элементов. Повышение качества и надёжности может быть достигнуто различными способами.

Различным аспектам проблемы надёжности полупроводниковых приборов посвящено большое количество научных публикаций, изданы монографии, учебники, спра-

вочники по этому вопросу [5-14]. Однако они быстро устаревают в связи с бурным развитием современной физики полупроводниковых приборов. Поэтому в данной обзорной статье делается попытка проанализировать те причины отказов и механизмов деградации, которые сказываются на надёжности полупроводниковых приборов.

Одной из основных причин деградации и отказов полупроводниковых приборов является наличие в них внутренних механических напряжений, релаксация которых сопровождается возникновением дефектов структуры.

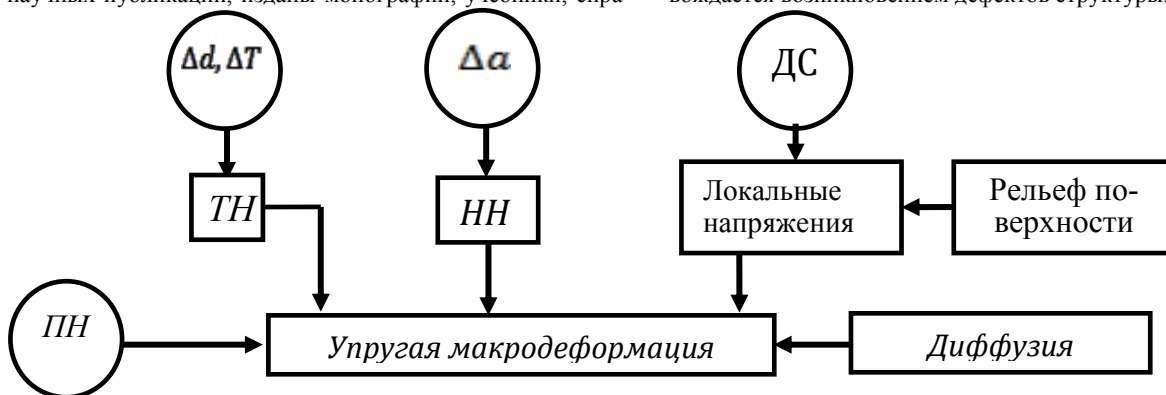


Рис. 1. Схема возникновения внутренних механических напряжений в гетеросистемах

Основной тип дефектов, возникающих при релаксации внутренних механических напряжений, это дислокации.

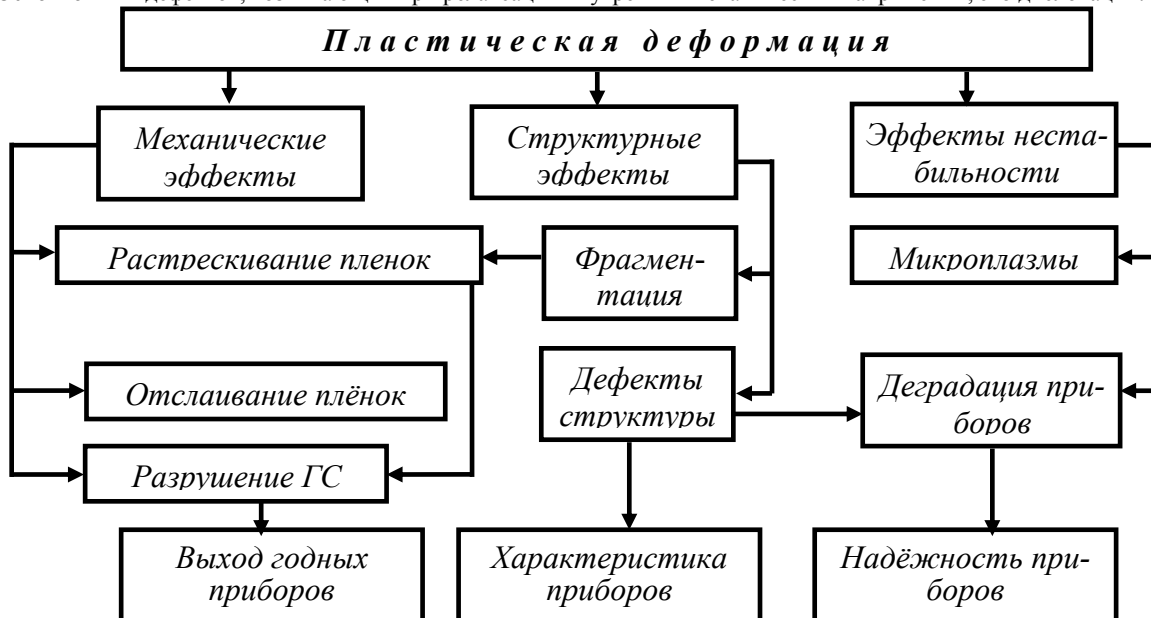


Рис. 2. Схема влияния пластической деформации на выход надёжность полупроводниковых приборов.

Различные внешние воздействия могут активировать релаксацию. Простейшее из них – термообработка системы, повышающая вероятность термофлуктуационного преодоления барьеров для зарождения и движения дислокаций. Более сложными, но и более важными с точки зрения полупроводникового приборостроения являются атермические механизмы активации релаксации напряжений. В настоящее время известны два таких механизма.

1) Известно что эффективность светоизлучающих гетеродиодов и гетеролазеров со временем уменьшается [7-10,14]. Деградация начинается с появления небольших незлучающих областей (с повышенной концентрацией центров безызлучательной рекомбинации), получивших название дефектов тёмных пятен, из которых затем развиваются протяжённые области – дефекты тёмных линий (ДТЛ). Этот эффект наблюдается при любых режимах накачки лазера (инжекция из р-п-перехода, оптическое возбуждение). С

помощью просвечивающей электронной микроскопии было показано, что ДТЛ связаны с дислокационными сетками, источниками которых являются ростовые дислокации в эпитаксиальном слое или ДН. Было также обнаружено, что деградация стимулируется внутренними напряжениями (как ДН, так и напряжениями, возникающими при сборке прибора).

Деградация гетеролазеров, сопровождающаяся возникновением ДТЛ, наблюдается только в условиях накачки, когда в рабочей области прибора происходит интенсивная рекомбинация электронно-дырочных пар. Энергия, выделяющаяся при безызлучательной рекомбинации, поглощается решёткой и стимулирует движение дислокаций в системе с заморозенной релаксацией. Такой рекомбинационно-стимулированный процесс происходит при относительно низкой температуре ($\sim 100^\circ\text{C}$) и представляет комбинированное перемещение дислокаций (скольжение и переползание), причём подвод к дислокациям точечных дефектов, необходимый для осуществления переползания, обеспечивается за счёт активации их диффузии при поглощении энергии, выделяемой при безызлучательной рекомбинации. Предложены разные механизмы такой активации.

2) Многочисленными исследованиями наблюдалась радиационно-стимулированная релаксация внутренних напряжений под воздействием облучения гетероэпитаксиальных структур (ГС) γ -квантами и быстрыми электронами.

Облучение позволяет дислокациями преодолеть барьеры или обойти их, в результате чего эффективные для аккомодации несоответствия дислокации могут достичь ГР, а неэффективные наклонные выйти из ГС. При этом возможно как переползание дислокаций при поглощении радиационных точечных дефектов, так и комбинация переползания со скольжением, когда дислокация за счёт переползания обходит барьер, двигаясь дальше скольжением. В обоих случаях важную роль играет радиационно-стимулированное переползание дислокаций, механизм которого заключается в следующем.

Дислокации в нерелаксированной ГС находятся в поле напряжений гетерограницы. В зависимости от направления вектора Бюргерса эти напряжения стремятся либо приблизить дислокации к ГР (если они уменьшают несоответствие), либо (в противном случае) удалить их от неё. В результате возникает вызванное напряжениями избирательное поглощение дислокациями точечных дефектов, а именно: те из дислокаций, движение которых требует достройки экстраплоскости, будут поглощать межузельные атомы и испускать вакансии, те же, переползание которых требует её укорочения, будут являться источниками межузельных атомов и стоками вакансий. В результате под действием облучения растворяются неэффективные для аккомодации несоответствия дислокации и за счёт этого дотраиваются экстраплоскости, связанные с ДН. При этом ГС переходит в состояние с более равновесной структурой, о чём свидетельствует появление упорядоченной сетки ДН.

Радиационно-стимулированная релаксация напряжений наблюдалась как при воздействии излучений с энергией, превышающей пороговую (γ -излучение ^{60}Co , электроны с энергией 1 МэВ), так и при облучении допороговыми электронами, рентгеновскими лучами, а также при возбуждении в системе горячих электронов при лавинном пробое. Это означает, что важную роль играет не только пересыщение кристалла новыми точечными дефектами, но и радиационно или рекомбинационно-стимулированная диффузия имеющихся в кристалле точечных дефектов к дислокациям, а также передача энергии высокоэнергетических частиц непосредственно участкам дислокаций.

Возможны и другие механизмы радиационно-стимулированной релаксации напряжений, например, индуцированное напряжениями избирательное зарождение призматических дислокационных петель. Этот механизм связан с образованием ориентированных в поле напряжений дислокационных петель при коагуляции точечных дефектов.

Генерация дислокаций представляет собой основной механизм релаксации внутренних напряжений в гетероэпитаксиальных системах. Она может происходить и в любых других гетероструктурах, в частности в системах металл-полупроводник, в которых металл играет роль контакта (омического или выпрямляющего) или теплоотвода. Нанесение металла при повышенных температурах (вплавнение, осаждение на подогреваемую подложку, термокомпрессия) приводит к возникновению и последующей релаксации ТН, сопровождающейся генерацией дислокаций и даже разрушением системы [3]. С возникновением дислокаций связана также пластическая релаксация в автоэпитаксиальных системах и диффузионных структурах.

В выяснении влияния внутренних напряжений на надёжность полупроводниковых приборов, работающих при прямом смещении (светодиодов, лазеров), а также диодов Ганна достигнуты большие успехи [4:6,10,14]. Однако сведения о влиянии структурных дефектов, обусловленных релаксацией механических напряжений, на надёжность диодов, работающих при обратном смещении, весьма ограничены [1,2,8]. Это связано, главным образом, с трудностями проведения прямых экспериментов по исследованию релаксации механических напряжений в реальных приборах. Такие напряжения могут возникать на различных этапах изготовления прибора [4:7-11], причём их релаксация может происходить как на том же, так и на других этапах, а так же в процессе работы прибора или его хранения.

Проведённые в [15-17] комплексные исследования причин отказов кремниевых ЛПД с помощью современных методов растровой электронной микроскопии показали, что от 20 до 30% эксплуатационных отказов происходит из-за наличия в ЛПД структурных дефектов (трещины в окисле, трещины на боковой поверхности меза-структуры, микро-трещины, скопления дефектов). Такого же порядка и по той же причине процент отказов после сборки ЛПД а корпус и после тренировки в режиме постоянного рабочего тока. Это заставляет разработчиков вести непрерывный поиск способов оптимизации технологического процесса, устанавливать и устранять конструктивно-технологические недостатки приборов.

Влияние плотности дислокаций в исходной эпитаксиальной структуре GaAs на деградацию обратной ветви ВАХ диодов GaAs-Cr и GaAs-Ge исследовано в [17-20]. В местах скопления дислокаций локализуются микроплазмы и образуются нити тока, что приводит к выгоранию диода в этих местах. Таким образом, неоднородное распределение исходных структурных дефектов по площади обратносмещённого диода обуславливает возможность катастрофических отказов. Деградация обратной ветви ВАХ арсенидгаллиевых диодов может быть также вызвана генерацией структурных дефектов в рабочем режиме диода, когда источником генерации дислокаций является микроплазма. Действительно, локализация тока в микрообъёме 10^{-11} - 10^{-12} см³ приводит к разогреву этого участка до температуры, превышающей температуру пластичности GaAs, а флуктуации тока при длительной работе диода, когда многократно повторяются режимы нагревание – остывание, приводят к генерации в окрестности этого микрообъёма новых дислокаций.

Анализ рентгеновских топограмм диодов Шоттки GaAs-Au, снятых при выдержке диодов в течение 30 минут при различной плотности обратного тока в области пробоя, указывает на появление полей микронапряжений в окрестности микроплазм, появляющихся перед катастрофическим отказом. Ранее нами в работе [20-22], а также в работе [23] было комплексно исследовано влияние дефектов на физические характеристики лавинно-пролётных арсенид галлиевых диодов.

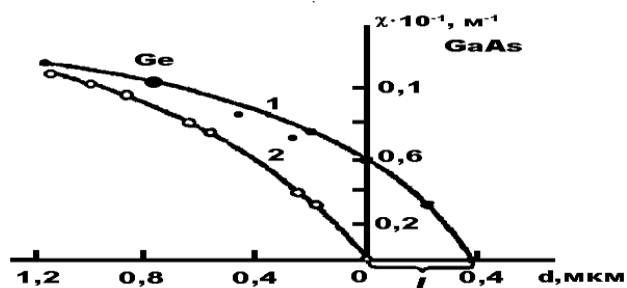


Рис. 3. Изменение кривизны Ge-GaAs при послойном травлении со стороны пленки: 1 – необлученная система, 2 – система, облученная гамма-квантами ^{60}Co до дозы $1,5 \cdot 10^8$ Р.

На рисунке показаны изменения кривизны Ge-GaAs пластин при послойном травлении их со стороны плёнки: 1 – необлученная система,

2 – система, облученная гамма-квантами ^{60}Co до дозы $1,5 \cdot 10^8$ Р. Из рисунка 3 следует, что необлученная ГС пластически деформирована (после удаления одной из компонент другая остается изогнутой и распрямляется лишь после удаления некоторого слоя материала, примыкавшего к ГР. Это означает, что дислокации, вносящие вклад в кривизну ГС, не лежат точно на ГР, а распределены в примыкающем к ней слою довольно значительной толщины.

Весьма важной причиной деградации обратной ветви ВАХ арсенидгаллиевых диодов Шоттки является взаимодействие исходных дислокаций в GaAs с дефектами, генерированными в процессе изготовления и работы прибора.

Другой не менее важной причиной изменения параметров приборов и понижения их надежности является возникновение локализованных пластически деформированных областей в GaAs при термокомпрессии [1:3,13]. Хотя в целом вопросы, связанные с подбором температурного режима и давления при термокомпрессии в настоящее время решаются успешно [8, 20], образование локальных пластически деформированных областей не исключено. Это обу-

словлено, в частности, тем, что соединения типа A_3B_5 обладают повышенной пластичностью по сравнению с германием и кремнием из-за меньшей величины энергии Пайерлса. При этом дислокации, образовавшиеся в процессе релаксации локальных напряжений, проявляют себя не только как генерационно-рекомбинационные центры и области ускоренной диффузии, приводящие вследствие «зарезания» времени жизни неосновных носителей заряда τ_p и уменьшения эффективной ширины области пространственного заряда к избыточным термогенерационным токам, но и как области локализации сильного электрического поля, ведущие к появлению в предпробойной области избыточных токов полевой природы и в конечном счете – к выгоранию диода. ВАХ таких диодов при обратном смещении могут быть нестабильными вследствие того, что под действием электрического поля и температуры дислокации (как присутствовавшие в исходном GaAs, так и генерированные при локальной пластической деформации) могут переползать.

В случае несоответствия коэффициентов линейного расширения GaAs и материала теплоотвода, что типично для современной технологии изготовления диодов с интегральным теплоотводом, релаксация термических напряжений приводит не только к генерации дислокаций, но и к образованию микро- и макротрещин. Прохождение трещин вблизи или непосредственно через рабочую площадь диода делает его потенциально ненадежным.

Таким образом, процессы деградации характерны для любых полупроводниковых приборов, поскольку технологические процессы создания приборов обычно ассоциируются с неравновесностью физической структуры в кристалле. Из вышесказанного следует, что основные механизмы деградации и отказов обусловлены в большинстве случаев с возникновением и перемещением дефектов кристаллической структуры, приводящей к оптимизации энтропии кристаллической решетки. Эти процессы, как правило, ускоряются при эксплуатационном режиме прибора.

Л и т е р а т у р а

1. Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах. - Киев: «Наукова думка», 1983. - С. 304.
2. Венгер Е.Ф., Грендел М., Данишка В., Конакова Р.В. и др. Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборных структурах. - Киев: «Феникс», 1994. - С. 244.
3. Венгер Е.Ф., Конакова Р.В., Коротченко Г.С. и др. Межфазные взаимодействия и механизмы деградации в структурах металл – InP и металл – GaAs. - Киев: 1999 - С. 233.
4. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. - М.: «Металлургия», 1984. - С. 256.
5. Шишияну Ф.С. Диффузия и деградация полупроводниковых материалов и приборов. - Кишнев: «Штинца», 1978. - С. 220.
6. Наумова В.П., Черноусов Р.П. Деградация инжекционных лазеров // Зарубежная электронная техника. 1974. N20. - С. 3-44
7. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников. - М.: «Металлургия». 1985. - С. 160.
8. Конакова Р.В., Кордош П., Тхорик Ю.А., Файнберг В.И., Штофаник Ф. Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов. - Киев: «Наукова думка», 1986. - С. 188.
9. Конакова Р.В., Матвеева Л.А., Солдатенко Н.Н., Тхорик Ю.А. Влияние механических напряжений на электрические параметры лавинно-пролётных гетеродиодов. Микроэлектроника. 1979, т.8, № 4. - С. 346-350.
10. Птащенко А.А. Деградация светоизлучающих диодов: (Обзор)- ЖПС, 1980. т.33, № 5. - С. 781-803.
11. Конакова Р.В., Тхорик Ю.А. Влияние структурных дефектов в арсениде галлия на деградацию и надежность ИМРАТТ-диодов // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 1983. Вып. 3. - С. 22-30
12. Исмаилов К.А. Сильнополевые и радиационные эффекты в арсенидгаллиевых приборных структурах. Автореферат докторской диссертации. - Ташкент: 1995. - С. 24.
13. Ровдо А.А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами. - Москва: Лайт.Лтд., 2000. - С. 288.
14. Торчинская Т.В., Шейнкман М.К. Физическая природа деградации светодиодов и полупроводниковых лазеров. ЖПС. 1983. т.38, № 3. - С. 371-382.
15. Ленов Н.Н., Ковшиков Е.К. Влияние механических напряжений, возникающих на сборочных операциях, на качество и надежность микросхем // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 1987. Вып.3. - С. 39-42.
16. Кандидова Л.А., Филатов М.Ю. Анализ причин отказов кремниевых ЛПД // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1982. Вып. 1. - С. 56-59.
17. Конакова Р.В., Мельников Г.Д., Тхорик Ю.А., Шварц Ю.М. Влияние структурных дефектов на развитие лавинного пробоя в гетеродиодах Ge-GaAs и диодах с барьером Шоттки Cr-GaAs. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. 1978. Вып. 28. - С. 67-69.
18. Vasilevskaya V.N., Konakova R.V., Melnikov G.D. et. al. Influence of interfacial structural defects on the development of avalanche breakdown in heterojunctions / Thin Solid Films. 1978. V.55. N.2. - P. 289-291.
19. Дорфман В.Ф. Микрометаллургия в микроэлектронике. - М.: «Металлургия», 1978. - С. 272.
20. Исмаилов К.А. «Влияние дефектов структуры на характеристики полупроводниковых приборов» - Материалы тезисы докладов. - Андижон: 23-24 ноябрь. 2004. - С. 3-4.
21. Исмаилов К.А., Бижанов Е.К. Деградационные явления в арсенидгаллиевых приборных структурах. // Узбекский физический журнал. 2008, №6, - С. 393-400.

22. Исмаилов К.А., Бижанов Е.К. Физические причины деградации арсенидгаллиевых лавинных диодов. – ДАН РУз. Математика, технические науки естествознание. 2011, № 5. -С. 36-38.

23. Belyaev A.E., Boltovets N.S., Venger E.F., Konakova R.V., Kudrik Ya.Ya., Milenin V.V., Milenin G.V. Physico-technological aspects of degradation of silicon micro-wave diodes. – Kiev: «Akademperiodika», 2011. – p.182.

РЕЗЮМЕ

Бу мақолада яримўтказгичли асбобларга оид масалалар кўриб чиқилган. Асосан, бугунги куни энг долзарб муаммолардан ҳисобланган яримўтказгичли асбобларда учрайдиган деградацион жараёнлар анализ қилиниб ўрганилган.

РЕЗЮМЕ

В статье рассматриваются вопросы связанные с работой и надёжностью полупроводниковых приборов. На основе анализа показаны деградационные процессы, происходящие в полупроводниковых приборах.

SUMMARY

The article deals with the issues of work and reliability of semi-conductor devices. On the basis of the analysis there have been shown the degradational processes in semi-conductor

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОТСТОЙНИКОВ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ И МЕЖХОЗЯЙСТВЕННЫХ КАНАЛАХ ИРРИГАЦИОННОЙ СЕТИ

К.К.Назарбеков - старший преподаватель

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

Таянч сўзлар: чўкидилар, сув ўтказиш, сув тўсиғи, тиндиргич, ер қазувчи машина, ер қозувчи кема, ағдариб тошлаш, сузувчи, курилиш.

Ключевые слова: насосы, водопропуск, водозабор, отстойник, землесос, земснаряд, пульповоды, отвалы, папильонирование, сооружение.

Key words: drifts, water supply, waterproof, settling tank, suction dredger, pulp water, sailing, digging erection, ding.

Каждый год в низовье реки Амударьи в магистральные и межхозяйственные оросительные каналы поступают наносы, интенсивно заилия их русел. Огромные денежные средства ежегодно расходуются в республике на выполнение работ по очистке каналов от наносов. Эти наносы сокращают водопропускную способность магистральных и межхозяйственных каналов.

Для защиты оросительных систем от заилиения применяются ирригационные отстойники. Оросительные системы с бесплотинным водозабором в большинстве случаев имеют однокамерные отстойники, представляющие собой расширенные и углубленные участки каналов. Длина головных отстойников должна составлять 0,5÷3,0 км, а внутрисистемных 0,3÷1,0 км. Очищают их от накопившихся наносов плавучими землесосными установками.

При плотинном водозаборе обычно устраивают многокамерные отстойники с гидравлической промывкой. Эффективность работы отстойников и их успех в борьбе с заилиением оросительных систем во многом зависит от правильной и умелой их эксплуатации.

Борьба с наносами осуществляется, в основном, путём осаднения крупных фракций наносов в головной части каналов и более мелких на начальных участках межхозяйственных каналов. Оседающие наносы удаляются механизированным способом с помощью электрических земснарядов и дизельных землесосов. Эффективность работы отстойников и их успех в борьбе с заилиением оросительных каналов во многом зависит от правильности расчёта, режима осаднения наносов, степени осветления потока, определения размеров отстойников и умелой их эксплуатации.

Анализ данных наблюдений за режимом работы отстойников показывает, что в процессе эксплуатации особо точного определения объёмов заилиения не требуется, поскольку гидравлические элементы непрерывно изменяются в зависимости от условия осаднения наносов и от интенсивности очистки. В этом случае заранее в отстойнике устанавливается ожидаемый объём отложений. Соответственно этому объёму начинается режим работы земснарядов и гидравлические элементы отстойников поддерживаются так, чтобы выходящая из них мутность соответствовала транспортирующей способности защищаемых от заилиения каналов.

Основное затруднение, с которым приходится сталкиваться при организации производства очистных работ – установление объёмов заилиения головного и межхозяйственного отстойников.

Для предварительных расчётов и в стадии проектного задания объём подлежащих осаднению в отстойнике взвешенных наносов V_3 определяется по среднедекадным значениям начальной ρ_0 и расчётных мутностей; $\rho_{расч}$

$$V_3 = \frac{86,4tQ}{\gamma_n}(\rho_0 - \rho_{расч}) \quad (1)$$

где t – время, за которое определяется объём осаднения в течение суток; Q – расход воды в отстойнике, m^3/c ; γ_n – объёмный вес осевших наносов ($\gamma_n = 125T/m^3$)

Для внутрисистемного отстойника в формуле (1) ρ_0 заменяются на мутность в начале этого отстойника.

Расчётный годовой объём наносов, который необходимо осаднить в отстойнике, определяется как сумма декадных объёмов. В объём заилиения отстойника нужно включить и донные наносы. Объёмный вес этих наносов принимается в пределах 1,4 – 1,5 т/м³.

Технология разработки больших отстойников землесосными снарядами с укладкой грунта в отвалы из подвесных пульповодов зависит от эксплуатационных условий отстойников. В большинстве случаев применяемая технология работ по разработке отстойников и каналов плавучими землесосными снарядами с транспортировкой грунтов в отвалы по плавучим и береговым пульповодам малоэффективна по своей конструктивно-технологической сложности. Известно, что проходка отстойника или канала в этих условиях обычно сопряжена с необходимостью выполнения следующих подготовительных и сопутствующих работ: а) подготовка территории для устройства первичной дамбы обвалования, укладка пульповодов, устройство дорожных коммуникаций; б) укладка и перекадка береговых пульповодов; в) частые подключения плавучих пульповодов к береговым; г) частые перекадки якорей при тросовом папильонировании земснарядов. (Рис.1.)

Несомненно, что указанные работы требуют значительных трудовых затрат и резко сказываются на снижении производительности земснарядов, уменьшая коэффициент их использования. Эффективная разработка больших отстойников и каналов в описываемых условиях практически невозможна без применения плавучих земснарядов на иной конструктивно – технологической основе, исключающей использование плавучих и береговых пульповодов, тросово – якорного перемещения в забоях земснарядов и их грунтозаборных устройств [3]. Разработанный в отделе строительных машин Гидропроекта землесосный снаряд с подвесным пульповодом типа 3000-ПП 130 отвечает таким требованиям. Этот земснаряд оснащён вращающейся платформой грунтозаборного устройства и напорно-поворотным свайным ходом.

В целях обеспечения гарантированного водозабора необходимо регулировать процесс осаднения наносов в головном отстойнике с помощью правильной организации очистных работ по времени и соответствующей расстановке земснарядов по длине отстойника.

Для своевременного удаления наносов рекомендуется на головном участке подводящей части канала производить

