

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622:504.55

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭКРАНА ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ПЛЕНКИ ШЛАМОХРАНИЛИЩА КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ОТ ШЛАМОВ И ДЕФОРМАЦИЙ ОТ ПОДРАБОТКИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИЖуравков М.А.¹, Кологривко А.А.², Коновалов О.Л.¹, Галузо О.Г.², Романов Д.В.²¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследований прочностных свойств противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки реконструируемой северной карты шламохранилища четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий» и даны практические рекомендации по его использованию, обеспечивающие геоэкологическую безопасность в период строительства и эксплуатации шламохранилища. Интерпретированы результаты модельных исследований поведения породного массива на участке реконструируемого шламохранилища. Дана оценка геоэкологической безопасности применения противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов и деформаций от подработки Вторым и Третьим калийными горизонтами в процессе эксплуатации северной карты шламохранилища.

Введение

Необходимость обеспечения поддержания производственных мощностей калийных предприятий в условиях ожидаемого заполнения отходами обогащения существующих карт шламохранилищ до их проектных отметок диктует развитие системы организации хвостовых хозяйств с реализацией мероприятий, снижающих техногенную нагрузку в районе, как за счет уменьшения изъятия дополнительных площадей под солеотвалы, используя при этом отработанные шламохранилища в качестве оснований при распылении солеотвалов, так и за счет реконструкции действующих шламохранилищ с надежным складированием в них жидких отходов, обеспечивающим геоэкологическую безопасность эксплуатации шламохранилищ [1-4].

Так, эксплуатируемое шламохранилище четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий» (далее – шламохранилище 4 РУ) практически заполнено. Реконструкция северной карты с получением дополнительной емкости 9,9841 млн м³ для складирования шламов обеспечит 4 РУ емкостями до 2027 года [5].

Для поэтапного и скорейшего ввода в эксплуатацию новых емкостей предусматривается реконструкция северной карты шламохранилища 4РУ в три пусковых комплекса. Первый пусковой комплекс обеспечивает наращивание дамб Д-2, Д-4 и дамбы рассолосборника до абсолютной отметки (далее – отметка) +172,90 м, наращивание дамбы Д-1 до отметки +170,50 м с устройством низового откоса до поверхности земли, устройство дамбы Д-3. Второй – строительство дамбы Д-7 до отметки +172,90 м, части

дамбы Д-6 до отметки +167,75 м, части дамбы Д-8 до отметки +160,00 м, ложа шламохранилища с отметкой дна +153,00 м. Третий – полное строительство дамб Д-5, Д-6 до отметки +172,90 м, полное строительство дамбы Д-8, ложа шламохранилища с отметкой дна +154,00 м. Отметки дна ложа второго и третьего пусковых комплексов, соответственно +153,00 м и +154,00 м, запроектированы, исходя из условий залегания безнапорных грунтовых вод, вскрытых на отметках от +145,99 до +149,50 м, максимальных ожидаемых оседаний земной поверхности от разработки Второго и Третьего калийных горизонтов, соответственно после 2036 и 2065 годов (2,6 м на ложе второго пускового комплекса и 2,5 м на ложе третьего), объемов выемки грунта для строительства.

Строительство последнего – третьего пускового комплекса – планируется завершить к 2019 году. В результате, общая емкость северной карты составит 14,27 млн м³, в том числе дополнительная – 9,984 млн м³. Шламохранилище 4 РУ будет располагаться на площади 127,7 га, в том числе на вновь отведенной площади 67,0 га.

Ограждающие дамбы Д-2, Д-3, Д-4, Д-5, Д-6, Д-7 относятся к III классу гидротехнических сооружений (согласно ТКП 45-3.04-169-2009). Длина дамб: Д-2 – 636 м, Д-3 – 977 м, Д-4 – 529 м, Д-5 – 635 м, Д-6 – 835 м, Д-7 – 637 м. Дамбы Д-2 и Д-4 наращиваются наружу на существующие ограждающие дамбы северной карты. Дамбы Д-5, Д-6, Д-7 – вновь отсыпанные. Существующая дамба Д-3 является разделительной между существующей южной картой и реконструируемой северной картой шламохранилища 4 РУ. Дамба Д-1 является разделительной между первым и вторым пусковыми комплексами и затапливается в третьем пусковом комплексе. Дамба наращивается наружу на существующую ограждающую дамбу северной карты до отметки гребня +170,50 м. Длина дамбы Д-1 – 909 м. Дамба Д-8 устраивается в выемке до отметки гребня +160,00 м, является разделительной между вторым и третьем пусковыми комплексами и затапливается в третьем пусковом комплексе. Длина дамбы Д-8 – 663 м. Возвышение гребня дамб над максимальным уровнем заполнения шламохранилища принято 1,50 м. В результате, новое ложе шламохранилища будет состоять из частей второго и третьего пусковых комплексов, разделенных дамбой Д-8.

Откосы ложа шламохранилища являются продолжением откосов дамб шламохранилища и по конструкции они такие же, как и в дамбах. Дно ложа конструктивно состоит из подстилающего слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,15 м, противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В [6] проектной толщиной 0,35 мм, защитного слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,10 м, защитного слоя из местного грунта толщиной 0,40 м.

От верха экрана до бермы на отметке +167,90 м принята толщина пленочного экрана 0,20 мм, ниже бермы и на дне ложа шламохранилища – 0,35 мм. Для устранения появления в пленочном экране растягивающих напряжений, которые будут вызваны процессами сдвижения пород и деформациями земной поверхности при подработке после 2036 года, пленку предусмотрено укладывать волнообразно без натяжения с компенсирующими складками с шагом 20 м вдоль осей дамб.

Конструкция экрана позволяет использовать материалы, производимые предприятиями республики. В шламохранилище предполагается хранение глинисто-солевых шламов и рассолов, относящихся к четвертому классу опасности (Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 31.12.2010 № 63). Так, складуемые отходы – глинисто-солевые шламы (ж:т = 1), содержание солей NaCl, KCl – 200-220 г/л. В жидкой (ж) фазе содержание шлама составляет до 8,5 % KCl, до 13,5 % NaCl и до 1 % CaCl₂, CaSO₄. В твердой (т) фазе шлама 70-75 % нерастворимого остатка (карбонаты, сульфаты, полевой шпат, кварц, гидрослюда и др.).

Подчеркнем, что для предотвращения загрязнения грунтовых вод рассолами с содержанием KCl , $NaCl$ в реконструируемом шламохранилище предусмотрено [5] устройство противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки марки В с минимально принятой ее проектной толщиной 0,20 мм, устраиваемого согласно [7].

Исследованиями [8, 9] установлено, что фильтрация рассолов из шламохранилищ калийного производства, ложе которых не обустроено противодиффузионным экраном, носит затухающий характер. Это связано с формированием уплотненного слоя глинисто-солевых шламовых отходов, характеризующегося меньшими фильтрационными свойствами, чем основания шламохранилищ, вследствие дифференциации твердой и жидкой фаз на стадии их осаждения и последующего уплотнения осадка и происходящих физико-химических процессов, сопровождающихся кристаллизацией галита из насыщенного рассола на поверхности глинистых частиц, служащих центрами кристаллизации в результате его перенасыщенности.

Отметим, что площадка строительства подвержена вредному влиянию деформаций земной поверхности на конец процесса сдвижения от отработки Второго (горизонт –440 м) и Третьего (горизонт –670 м) калийных горизонтов столбовой системой разработки с валовой выемкой руды. Очистная выемка Второго калийного горизонта будет вестись в период 2038-2061 гг. лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м, Третьего калийного горизонта – в период 2062-2077 гг. в сложных горно-геологических условиях лавами длиной 100-200 м с вынимаемой мощностью ~2,2 м. Проектные величины ожидаемых деформаций составят следующие значения: оседание $2012 \div 2386$ мм, наклон $(2,9 \div 3,6) \times 10^{-3}$, кривизна $(-0,30 \div 1,41) \times 10^{-4}$ 1/м, горизонтальные деформации $(-0,35 \div 2,80) \times 10^{-3}$ [5]. Для ускорения формирования рассолонепроницаемого глинисто-солевого слоя предусмотрено устройство противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки в основании строящегося шламохранилища с подачей на первом этапе глинисто-солевой смеси, жидкая фаза которой имеет минерализацию не менее 250 г/л. При таком составе в основании осажденной толщи шламов будет сформирован защитный экран, который в процессе эксплуатации пленки будет служить барьером на пути фильтрации рассолов и диффузии.

Поэтому необходимо было выполнить исследования по изучению геоэкологической безопасности эксплуатации шламохранилища 4 РУ в части предотвращения фильтрации рассолов и диффузионного проникновения солей в подстилающие грунты и грунтовые воды и недопущения, тем самым, осложнения техногенеза в районе размещения шламохранилища, вследствие появления новых условий при воздействии прогнозируемой нагрузки (давления) от шламов на противодиффузионный экран из полиэтиленовой пленки и подработки шламохранилища в период его эксплуатации.

Заметим, что прочностные характеристики полиэтиленовых пленок, используемых в качестве противодиффузионных экранов, согласно [6], представлены их минимальными значениями. В этой связи, исследования прочностных свойств полиэтиленовой пленки, используемой в условиях производства строительных работ, представляются актуальными для практических целей, принимая во внимание то обстоятельство, что реальные прочностные характеристики полиэтиленовой пленки используются в качестве исходных данных для исследований воздействия на противодиффузионный экран нагрузок от шламов и деформаций от подработки шламохранилища 4 РУ в период его эксплуатации.

Изложенное выше свидетельствует об актуальности исследований по оценке геоэкологической безопасности применения противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки марки В с минимально принятой ее проектной толщиной 0,20 мм в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов ~20 м и деформаций

от подработки горными работами Второго калийного горизонта (горизонт –440 м) столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м и Третьего калийного горизонта (горизонт –670 м) в сложных горно-геологических условиях столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной 100-200 м с вынимаемой мощностью ~2,2 м в процессе эксплуатации северной карты шламохранилища 4 РУ.

Результаты исследований и их интерпретация

Результаты исследований полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм на прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве [10], сопротивление раздиру [11], водонепроницаемость и сопротивление динамическому продавливанию [12] представлены в таблицах 1 и 2. Графическая зависимость нагрузки от удлинения полиэтиленовой пленки толщиной 0,20 мм представлена на рисунке 1.

Таблица 1. – Результаты исследований полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм на прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, сопротивление раздиру

Наименование показателя	Значения показателей					
	частные					средние
Толщина пленки, мм	0,20	0,19	0,21	0,20	0,18	0,20
Прочность при растяжении пленки, МПа	15,8	15,8	16,2	16,5	15,8	16,0
Относительное удлинение при разрыве, %	535	500	470	515	530	510
Сопротивление раздиру, Н/мм	81	86	86	81	86	84

Таблица 2. – Результаты исследований полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм на водонепроницаемость и сопротивление динамическому продавливанию

Наименование показателя	Значения показателей
Водонепроницаемость	В течение 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась
Сопротивление динамическому продавливанию	После динамического продавливания в течение 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась

Исследования прочностных свойств противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки марки В выполнены для нормального температурного режима (образцы кондиционировали не менее 16 ч при температуре 23 ± 2 °С). Такое решение обосновано тем обстоятельством, что согласно пункту 5.2.3 [5], дно ложа шламохранилища конструктивно состоит из подстилающего слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,15 м, противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки, защитного слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,10 м, защитного слоя из местного грунта толщиной 0,40 м.

Известно, например, из пункта 5.4 [7], что устройство противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки, как правило, выполняют при положительной температуре воздуха. В случае же отрицательной температуры должно быть обеспечено соответствие качества грунтов подстилающего и защитного слоев, а также пленочного элемента требуемому, что и предусматривается пунктами 5.2.3 и 5.2.4 [5].

Противофильтрационный экран должен быть надежным в эксплуатации в течение всего срока службы шламохранилища. Надежность его эксплуатации должна определяться в первую очередь свойствами полиэтиленовой пленки. Эти свойства должны быть таковы, чтобы различные виды воздействий (например, механические напряжения, влияние рассолов, колебания температур и др.), возможных как в эксплуатационный, так и строительный периоды, не вызвали бы изменений в самой полиэтиленовой пленке или ее механических повреждений, недопустимых с точки зрения надежности противофильтрационного экрана. Так, недопустимыми являются не только проколы, порезы, некачественно выполненные компенсационные складки, некачественно выполненные деформационные швы, но и их изменения, которые могут привести к нарушению сплошности полиэтиленовой пленки и, следовательно, к потере водонепроницаемости в срок, меньший срока службы самого шламохранилища. При ведении строительных и горных работ должен осуществляться постоянный геомеханический мониторинг за состоянием горного массива, включающий как визуальный, так и инструментальный контроль с применением инженерно-геологических и геофизических методов.

При отсутствии в полиэтиленовой пленке механических повреждений, благодаря ее малой пористости, движение воды (водной среды) через пленку возможно лишь в виде диффузии молекул воды и растворенных в ней веществ. Диффузионные потери воды, однако, крайне незначительны. По результатам испытаний установлено, что проектная полиэтиленовая пленка является водонепроницаемой. Так, при испытании пленки на водонепроницаемость и сопротивление динамическому продавливанию не менее 24 ч при давлении 1,0 МПа, на поверхности пленки вода не появилась.

Из характеристик полиэтиленовой пленки главными следует считать степень деформирования, прочность, водонепроницаемость. От самой пленки требуется способность к большим деформациям. В связи с тем, что пленка имеет малую толщину – 0,20 мм – она не участвует в статической работе ложа шламохранилища, а лишь адаптируется к условиям его работы в процессе нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами. В частности, при облегании неровностей контактной поверхности в пленке возникают неравномерно распределенные по толщине деформации растяжения и сжатия. Величины этих деформаций зависят от размеров выступов или впадин зоны контакта и толщины пленки [13].

В процессе эксплуатации противофильтрационных экранов из полиэтиленовых пленок под воздействием тепла, ультрафиолетового излучения и кислорода пленки стареют, что выражается в постепенном ухудшении их прочностных свойств и развитии микродефектности. Оценка старения полиэтиленовых пленок в условиях эксплуатации, в конечном счете, имеет один действительный критерий – опыт эксплуатации. Расположенные в грунтах пленки практически не стареют или скорость их старения чрезвычайно мала [13]. Одним из факторов, вызывающих изменение важнейших прочностных свойств полиэтиленовой пленки во времени, является атмосферное воздействие, глав-

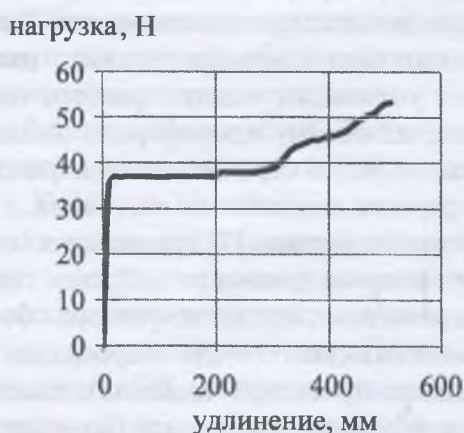


Рисунок 1. – Зависимость нагрузки от удлинения полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм

ным образом ультрафиолетовая часть солнечной радиации, воздействующая на пленку в случае ее незащищенного состояния. Защитный слой над пленкой исключает воздействие на материал ультрафиолетового излучения. Слой глинисто-солевых шламов существенно уменьшает участие фактора температуры и ее колебаний. Считаем, что для сведения к минимуму атмосферных воздействий необходимо максимально сократить продолжительность строительного периода, когда пленка находится в незащищенном от атмосферного воздействия состоянии.

Согласно нормам [7] при напорах более 10 м (в исследуемом случае ~20 м) толщина полиэтиленовой пленки от действия гидростатического давления определяется инженерными расчетами, исходя из условия обеспечения ее сплошности. Так, от верха экрана до бермы на отметке +167,90 м проектная толщина пленочного экрана принята 0,20 мм (минимальная проектная толщина), ниже бермы и на дне ложа шламохранилища – 0,35 мм, что должно обеспечить безопасность шламохранилища при его эксплуатации. Для полного устранения появления в полиэтиленовой пленке растягивающих напряжений, которые могут быть вызваны процессами сдвигания массива горных пород и деформации земной поверхности в период подработки шламохранилища 4 РУ после 2036 года, пленку необходимо укладывать волнообразно без натяжения с компенсирующими складками с шагом 20 м вдоль осей ограждающих дамб согласно нормам, например, условиям пункта 3.8 [14] и нормам [7]. По нашему мнению, с целью повышения надежности производства работ в строительный период полиэтиленовую пленку целесообразно укладывать в два слоя.

Дополнительным фактором, повышающим надежность противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в период подработки горными работами, проводимыми с 2036 года на Втором, а с 2065 – на Третьем калийном горизонте, следует считать создание по ложе и откосам шламохранилища к началу подработки дополнительного экрана из твердой части шламовых отходов, который, согласно исследованиям [8, 15-17], даже в случае возникновения трещин в пленочном экране исключит фильтрацию из шламохранилища и будет являться дополнительной мерой защиты экрана от подработки.

По результатам изучения и анализа инженерно-геологических изысканий толщи грунтов, слагающих ложе реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ до разведанной глубины 20,0 м [18], анализа и оценки геологического строения участка реконструкции по геологическим колонкам пяти скважин № 201 ($X = 14409,97$ м; $Y = 41409,97$ м; глубина скважины 904 м), № 216 ($X = 13912,05$ м; $Y = 39555,60$ м; глубина скважины 949 м), № 305 ($X = 15038,50$ м; $Y = 39962,07$ м; глубина скважины 856,1 м), № 309 ($X = 13394,88$ м; $Y = 40938,44$ м; глубина скважины 837,5 м), № 788г (глубина скважины 570 м), с учетом проектных решений [5], планов ведения очистных работ на Втором и Третьем калийных горизонтах, принимая во внимание результаты исследований и интерпретацию прочностных свойств противofильтрационного экрана между шламом и ложем шламохранилища, составлена геометрическая и построена механико-математическая модель поведения горного массива исследуемого района (в работе непосредственно принимал участие кандидат физико-математических наук А.В. Круподеров).

Для получения максимально точных результатов, учитывая ранее проведенные исследования в части деформационных процессов в твердых деформируемых средах [19-21], принято решение об использовании плоской модели, позволяющей построить более качественное конечно-элементное разбиение. Заметим, что «наихудший», с точки зрения механического состояния пленки, случай возможен при исследовании противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки от прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов и деформаций от подработки в период эксплуатации шла-

мохранилища с минимальной проектной толщиной полиэтиленовой пленки 0,20 мм (максимальная проектная толщина 0,35 мм), что позволяет представить прогнозную оценку геоэкологической безопасности эксплуатации противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки шламохранилища калийного производства.

Данные по физико-механическим свойствам массива ниже 20,0 м выбраны на основе изучения результатов инженерно-геологических изысканий [18] и согласно геологическим колонкам скважин № 201, № 216, № 305, № 309, № 788г.

Считаем, что эффективность оценки геоэкологической безопасности северной карты шламохранилища 4 РУ, в основании которого устроен противофильтрационный экран из полиэтиленовой пленки марки В, определяется уровнем типизации как самих элементов единой геосистемы «шлам – противофильтрационный экран – подрабатываемый массив» (далее – единая геосистема), так и их взаимосвязей, учитывающих изменение техногенных и антропогенных факторов. Оценка зависит от уточненной инженерно-геологической информации во времени при геомеханическом мониторинге за состоянием массива горных пород в период ведения строительных и горных работ, включающем как визуальный, так и инструментальный контроль с применением инженерно-геологических и геофизических методов. В этой связи основой для оценки геоэкологической безопасности эксплуатации противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки северной карты шламохранилища 4 РУ является установление на базе фактической инженерно-геологической информации области рациональных значений параметров локального поведения массива с построением его механико-математической модели. Модель должна обладать свойствами открытой системы и отображать представление об объекте и протекающих в нем процессах, исходя из имеющейся на момент исследования инженерно-геологической информации. Такой подход к изучению единой геосистемы позволит принимать основополагающие решения при проектировании реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ, в дальнейшем трансформируемые в конкретные инженерные решения с учетом существенных для объекта техногенных факторов. Реализация изложенного позволит в процессе оценки техногенеза учитывать неопределенность исходной информации (особенно горно-геологической), разницу во времени между принятием решения и его реализацией, а также принципиальные трудности изменения этих решений в процессе эксплуатации шламохранилища, характеризующиеся совокупностью переменных природных, техногенных и антропогенных факторов, взаимодействие которых создает множество комбинаций, отражающих специфику требований к технологии ведения работ.

Принимая во внимание вышеизложенное, и в связи с тем, что реальные технологические процессы происходят в большом временном интервале, считаем корректным решение задач в квазистатической постановке. При этом, исходя из основной цели исследований, допустимо верхние слои, включая песок, дамбы и шлам, принять как изотропные.

В соответствии с принятыми допущениями, связь между компонентами напряженно-деформируемого состояния (НДС) для элементов рассматриваемой единой геосистемы можно представить в виде (1).

Поскольку ниже 20,0 м слоистость массива оказывает значительное влияние на распределение компонент НДС, его поведение рассматривается в рамках модели трансверсально-изотропной среды. В этом случае состояние массива определяется заданием пяти констант: E_p и ν_p – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона в горизонтальной плоскости (плоскости изотропии); E_z , ν_{zp} и G_{zp} – соответственно модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига в вертикальном направлении. Если вертикальную ось обозначить как ось Oz , закон Гука запишется в форме (2).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda+2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda+2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda+2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где σ, ε – компоненты соответственно напряжений и деформаций;

$$\lambda, \mu \text{ – параметры Ламе, } \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

ν – коэффициент Пуассона;

E – модуль Юнга.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1-\nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_p + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_p + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{1-\nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} \lambda & \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{1-\nu_p^2}{E_p^2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{zp} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{zp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_p}{1+\nu_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$\nu_{pz} = \frac{E_p}{E_z} \nu_{zp},$$

$$\Delta = \frac{(1+\nu_p)(1-\nu_p-2\nu_{zp}\nu_{pz})}{E_p^2 E_z}.$$

В связи с тем, что полиэтиленовая пленка, в силу своих геометрических параметров, не оказывает существенного влияния на распределение компонент напряжений в массиве, а может лишь оказывать некоторое влияние на тип контакта тел, между которыми она располагается, учитывать ее непосредственно в модели представляется нецелесообразным. Более эффективно выполнить варьирование коэффициентом трения между дамбами и шламом, а также между песком и шламом. Деформацию же самой полиэтиленовой пленки в модели можно оценить по деформациям прилегающих к ней тел (элементов массива и инженерных объектов) в месте ее устройства.

Упругие свойства грунта и массива представлены в таблицах 3 и 4, интервалы которых выбраны по данным литологии скважин № 201, № 216, № 305, № 309, № 788г.

Таблица 3. – Упругие свойства грунта

Вид грунта	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
шлам	7	0,499	2000
песок средний	27	0,300	2000

Таблица 4. – Упругие свойства массива горных пород

Слой	E_p , ГПа	E_z , ГПа	ν_p	ν_z	G_{zp} , ГПа	Кровля	Подошва
осадочный	1	1	0,3	0,3	0,0577	130,985	10
глинисто-мергелистый	5	5	0,3	0,3	0,2850	10	-400
соляной	14	14	0,3	0,3	0,8000	-400	-1000

Механико-математическая модель, описывающая НДС исследуемой единой геосистемы, включает уравнения равновесия (3), совместности деформаций (4), состояния среды – закон Гука (1), а также граничные условия.

В соответствии с введенной механико-математической модельной задачей граничные условия выбирались в следующем виде: между всеми слоями задавались условия полного контакта; соляная толща по своей подошве предполагается жестко закрепленной; на боковых границах перемещения в горизонтальном направлении отсутствуют; на границах контакта шлама и песка, а также шлама и дамб задаются условия типа (5).

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} = -\rho g.$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial y \partial x}. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{n1} = \sigma_{n2}; \\ u_{n1} = u_{n2}; \\ u_{\tau 1} = u_{\tau 2}, \quad |\sigma_{\tau}| < f \cdot \sigma_n; \\ \sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2}, \quad |\sigma_{\tau}| < f \cdot \sigma_n; \\ \sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} = f \cdot \sigma_n, \quad |\sigma_{\tau}| > f \cdot \sigma_n, \end{array} \right. \quad (5)$$

где 1, 2 – контактирующие тела;

f – коэффициент трения;

σ_n, σ_{τ} – соответственно нормальные и касательные усилия;

u_n, u_{τ} – соответственно нормальные и касательные перемещения.

Схема решения задачи следующая. На первом шаге вычислялось НДС массива с учетом дамб, но без шлама, при этом НДС принималось как начальное. На втором шаге вычислялось НДС массива с учетом влияния шлама (рисунок 2), при этом анализировались возможные деформации противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки, вызванные прогнозируемой нагрузкой на него со стороны шлама с учетом исследованных прочностных свойств. Далее последовательно удалялись блоки сначала Второго (горизонт –440 м), а затем Третьего (горизонт –670 м) калийного горизонтов.

На этих шагах вычислялось НДС массива и деформации противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки.

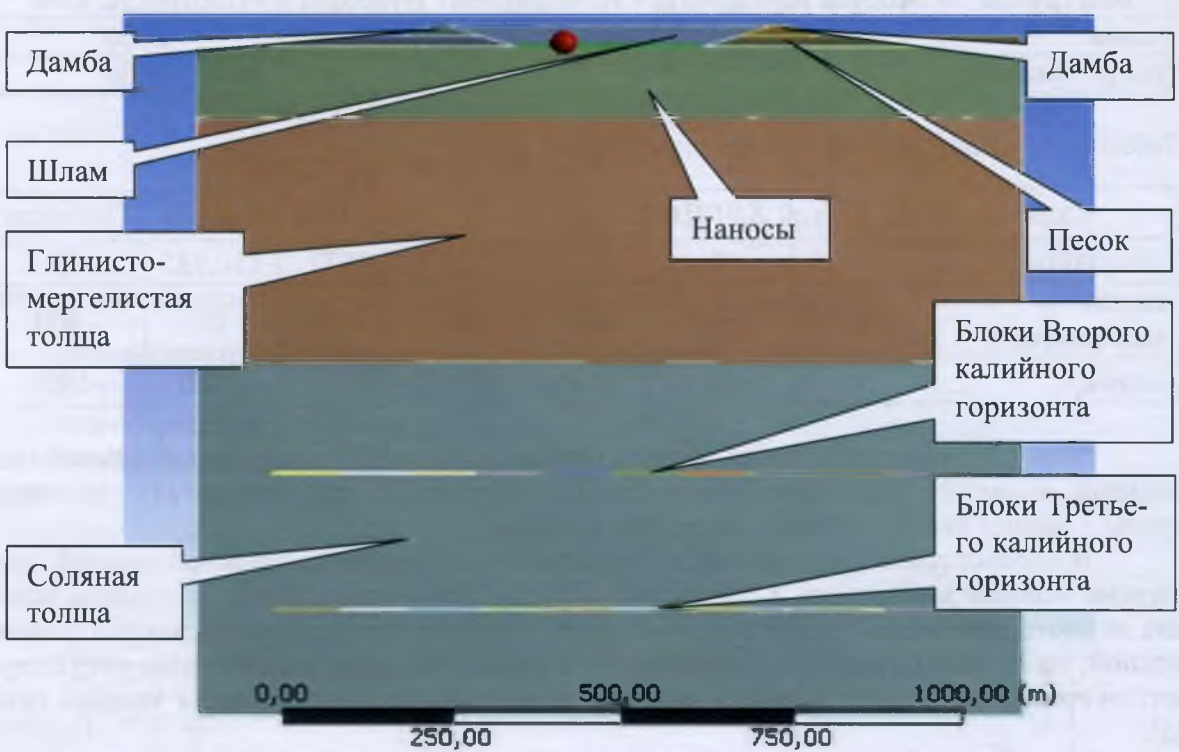


Рисунок 2. – Геометрическая модель участка реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ при наличии шлама

Проведена серия модельных расчетов для различных значений коэффициента трения на поверхностях контакта в месте устройства полиэтиленовой пленки для случаев отсутствия контакта ($f = 0$) и полного контакта ($f = 1$), а также при $f = 0,3$. Проведенные модельные исследования показали, что отработка блоков Третьего калийного горизонта (после отработки блоков Второго калийного горизонта) при отсутствии и полном контактах не оказывает существенного влияния на распределение максимальных главных напряжений в районе реконструируемого шламохранилища, в ложе которого устроен противофильтрационный экран из полиэтиленовой пленки. На рисунках 3-5 представлены некоторые результаты расчетов по максимальным главным деформациям при гладком контакте.

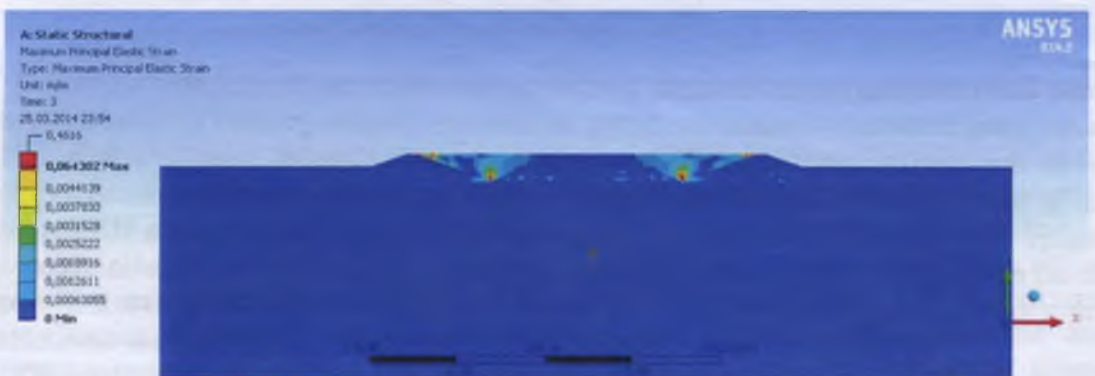


Рисунок 3. – Распределение максимальных главных деформаций при наличии шлама



а, б – после обработки первого блока; в, г – четвертого; д, е – седьмого; ж, з – десятого
 Рисунок 5. – Распределение максимальных главных напряжений в окрестности линии контакта шлама с песком после обработки блоков Второго калийного горизонта

Интерпретация модельных исследований, выполненных для случаев отсутствия и полного контактов шлама и дамб, позволяет считать значительным запас прочности исследуемого противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки с учетом «наихудшего» варианта развития геомеханической ситуации и минимально принятой по проекту толщиной пленки. Угроза разрыва противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях воздействия на него прогнозируемой нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами Второго и Третьего калийных горизонтов не прослеживается. Так, максимальные растягивающие деформации противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта не превышают 0,20 (20 %), полного – 0,15 (15 %), что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными деформациями разрыва полиэтиленовой пленки в 510 %. Максимальные растягивающие напряжения противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта не превышают 3×10^5 Па, полного – 3×10^4 Па, что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными напряжениями разрыва полиэтиленовой пленки $16,0 \times 10^6$ Па.

Заключение

В результате проведенных исследований по оценке геоэкологической безопасности эксплуатации противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ ОАО «Беларуськалий» в условиях прогнозируемого воздействия нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами изучена толща грунтов, слагающая ложе шламохранилища и геологическое строение массива участка, на котором ведут работы по реконструкции, принимая во внимание проектные решения в части реконструкции шламохранилища и результаты исследований прочностных свойств противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки с ее минимальной проектной толщиной. На основе исходных данных построена механико-математическая модель поведения исследуемого участка массива и проведены модельные исследования. Их обобщение позволяет представить следующие интерпретированные заключения.

1. Подработка реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ ОАО «Беларуськалий», в основании которого устроен противofильтрационный экран из полиэтиленовой пленки марки В, будет вестись горными работами Второго калийного горизонта (горизонт –440 м) в период 2038-2061 гг. столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м и Третьего калийного горизонта (горизонт –670 м) в период 2062-2077 гг. в сложных горно-геологических условиях столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной 100-200 м с вынимаемой мощностью ~2,2 м.

Подработка не будет оказывать существенного влияния на распределение максимальных главных напряжений в районе шламохранилища (значительных увеличений главных напряжений на шламохранилище, в основании которого устроен противofильтрационный экран из полиэтиленовой пленки, по результатам исследований не прослеживается).

На контакте шлама и подстилающего противofильтрационный экран слоя мощностью 0,15 м, сложенного из песка с частицами крупностью не более 5 мм, максимальные главные напряжения являются сжимающими, что не представляет опасности для принятого по проекту противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки и не может представлять опасности для укладываемой ниже бермы и на ложе шламо-

хранилища противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В максимальной проектной толщины 0,35 мм.

2. Максимальные растягивающие деформации (относительное удлинение при разрыве) противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта по результатам модельных исследований не превышают 20 %, в случае полного контакта – не превышают 15 %, что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными деформациями разрыва полиэтиленовой пленки, составляющими 510 % по результатам исследований ее прочностных свойств.

3. Максимальные растягивающие напряжения (прочность при растяжении) противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта по результатам модельных исследований не превышают $3,0 \times 10^5$ Па, в случае полного контакта – не превышают $3,0 \times 10^4$ Па, что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными напряжениями разрыва полиэтиленовой пленки, составляющими $16,0 \times 10^6$ Па по результатам исследований ее прочностных свойств.

4. По результатам численных экспериментов по оценке геоэкологической безопасности применения противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В минимальной проектной толщиной 0,20 мм в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами при эксплуатации шламохранилища, принимая во внимание прогнозируемый «наихудший» с точки зрения механики случай развития ситуации (для получения максимально точных результатов, использована плоская модель; предельные характеристики приняты для минимальной толщины эксплуатируемого противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В 0,20 мм), при значительном запасе прочности экрана, угроза разрыва полиэтиленовой пленки от растягивающих напряжений не прослеживается.

5. При отсутствии в проектируемой полиэтиленовой пленке механических повреждений, благодаря ее малой пористости, движение воды через пленку возможно лишь в виде диффузии молекул воды и растворенных в ней веществ. Диффузионные потери воды крайне незначительны. Полиэтиленовая пленка является водонепроницаемой. Так, при испытании пленки на водонепроницаемость не менее 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась; при испытании пленки на сопротивление динамическому продавливанию не менее 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась.

6. Применение противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов (~20 м) и деформаций от подработки горными работами Второго и Третьего калийных горизонтов, где очистная выемка руды будет вестись соответственно лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м и лавами длиной 100-200 м в сложных горно-геологических условиях с вынимаемой мощностью ~2,2 м, при эксплуатации северной карты шламохранилища 4 РУ обеспечивает геоэкологическую безопасность при толщине пленки как минимум 0,20 мм.

7. Учитывая проведенные модельные испытания поведения противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях прогнозируемого воздействия нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами, а также испытания пленки на водонепроницаемость, можно констатировать, что предусмотренная проектом полиэтиленовая пленка марки В толщиной 0,20 и 0,35 мм обеспечивает защиту грунтовых вод от минерализации. При этом увеличение ее толщины не требуется при условии обеспечения проектных требований по ее укладке.

8. При устройстве противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки с целью обеспечения геоэкологической безопасности района шламохранилища 4 РУ проектируемый противofильтрационный экран должен быть надежным в эксплуатации в течение всего срока службы шламохранилища. Надежность его эксплуатации определяется, в первую очередь, свойствами полиэтиленовой пленки, которые должны быть таковы, чтобы различные виды воздействий (например, механические напряжения, влияние рассолов, колебания температур и др.), возможные как в эксплуатационный, так и строительный периоды, не вызвали бы изменений в самой полиэтиленовой пленке или ее механических повреждений, недопустимых с точки зрения надежности противofильтрационного экрана. Так, недопустимыми являются не только проколы, порезы, некачественно выполненные компенсационные складки, некачественно выполненные деформационные швы, но и деформации пленки, которые могут привести к нарушению сплошности полиэтиленовой пленки и, следовательно, к потере водонепроницаемости в срок, меньший срока службы самого шламохранилища.

В целях повышения надежности производства работ в строительный период полиэтиленовую пленку целесообразно укладывать в два слоя.

Принимая во внимание исключительную важность соблюдения требований нормативных документов, многолетнюю положительную практику укладки полиэтиленовых пленок и в целом – эксплуатацию шламохранилищ, для защиты пленки от разрыва или сведения к минимуму возможности нарушения противofильтрационного экрана при растяжениях в процессе подработки, рекомендуется укладывать ее с компенсирующими складками шагом 20,0 м, расположенными вдоль осей ограждающих дамб.

При ведении строительных и горных работ должен осуществляться постоянный геомеханический мониторинг за состоянием горного массива, включающий как визуальный, так и инструментальный контроль с применением инженерно-геологических и геофизических методов.

9. При изменении технических решений по использованию противofильтрационного экрана и, как следствие, изменении условий его эксплуатации (например, использование отработанного шламохранилища в качестве основания солеотвала) необходимо проводить дополнительные исследования.

10. Для мониторинга состояния геологической среды в районе эксплуатации полиэтиленовой пленки в качестве противofильтрационного экрана рекомендуется проводить гидрогеологические и геофизические исследования.

Список цитированных источников

1. Шемет, С.Ф. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений / С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 100-104.

2. Смычник, А.Д. Технологии складирования отходов калийного производства / А.Д. Смычник, С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // X Юбилейная национальная конф. с междунар. участием по открытой и подводной добыче полезных ископаемых: сб. науч. статей. – Варна, 2009. – С. 494-496.

3. Журавков, М.А. Формирование солеотвала из галитовых отходов способом гидронамыва / М.А. Журавков, С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко, А.В. Круподеров, О.Л. Коновалов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : сб. науч. трудов 9-ой междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Минск, 29-31 окт. 2013 г.: в

2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; ред.: А.Б. Копылов, И.А. Басалай. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 246-253.

4. Кологривко, А.А. Геоэкологические задачи при реконструкции шламохранилищ калийного производства / А.А. Кологривко // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 10-ой Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула, 6-7 нояб. 2014 г.: в 2 т. / Тул. гос. ун-т; ред.: Р.А. Ковалев. – Тула, 2014. – Т. 1. – С. 363-368.

5. Архитектурный проект «Техперевооружение СОФ 4 РУ. Реконструкция северной карты шламохранилища. Первый пусковой комплекс. Второй пусковой комплекс. Третий пусковой комплекс». Пояснительная записка / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2012. – Т. 1. – 180 с.

6. Пленка полиэтиленовая. Технические условия: ГОСТ 10354-82. – Введ. 01.07.83. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам. – 2007. – 22 с.

7. Инструкция по проектированию и строительству противofильтрационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов: СН 551-82: утв. Постановл. Государственного Комитета СССР по делам строительства 31.05.82. – М.: Стройиздат, 1983. – 40 с.

8. Колпашников, Г.А. Техногенез и геологическая среда / Г.А. Колпашников. – Минск: БНТУ, 2006. – 182 с.

9. Кологривко, А.А. Прогнозирование и предотвращение фильтрации рассолов в период подработки шламохранилищ / А.А. Кологривко // Промышленная экология: сб. тр. Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 27-28 окт. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; ред.: И.А. Басалай. – Минск, 2015. – С. 118-121.

10. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 14236-81. – Введ. 09.02.81. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам: Министерство химической промышленности. – 1989. – 8 с.

11. Пленки полимерные. Методы определения сопротивления раздиру: ГОСТ 26128-84. – Введ. 01.01.85. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам. – 1984. – 12 с.

12. Материалы рулонные кровельные и гидроизоляционные. Методы испытаний: ГОСТ 2678-94. – Введ. 01.01.96. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации и техническому нормированию в строительстве: Институт ВНИИстройполимер АООТ «Полимерстройматериал» РФ. – 2003. – 28 с.

13. Пленочные противofильтрационные устройства гидротехнических сооружений / В.Д. Глебов [и др.]; под ред. И.Е. Кричевского. – М.: Энергия, 1976. – 208 с.

14. Указания по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Старобинского месторождения калийных солей: утв. Проматомнадзором при МЧС РБ 03.04.01 г. – Солигорск, 2002. – 341 с.

15. Технические решения по усовершенствованию конструкции дамб шламохранилищ с мерами их охраны в условиях подработки / БФ ВНИИГ; рук. А.В. Воробьев; исполн. Г.П. Иванов, С.Ф. Шемет. – Минск, 1991. – 14 с.

16. Разработка рекомендаций по использованию глинистых грунтов и шламов для устройства противofильтрационных элементов шламохранилища ПО «Беларуськалий» (Томилова гора): отчет о НИР / ВНИИ ВОДГЕО; рук. В.В. Буренкова; отв. исполн. В.В. Буренкова. – М., 1991. – 37 с.

17. Исследование и разработка специальных мер защиты дамб шламохранилищ на калийных месторождениях: отчет о НИР (заключ.) / ЛПИ; науч. рук. Г.Я. Булатов; отв. исполн. В.А. Леонов. – Л., 1983. – 55 с.

18. Техперевооружение СОФ 4 РУ. Реконструкция северной карты шламохранилища. Первая очередь. Вторая очередь: отчет об инженерно-геологических изысканиях по объекту. Часть 1 / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2011. – 113 с.

19. Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов) / М.А. Журавков. – Минск: БГУ, 2002. – 456 с.

20. Журавков, М.А. Фундаментальные решения теории упругости и некоторые их применения в геомеханике, механике грунтов и оснований. Курс лекций / М.А. Журавков. – Минск: БГУ, 2008. – 247 с.

21. Компьютерное моделирование в геомеханике / М.А. Журавков [и др.]; под общ. ред. М.А. Журавкова. – Минск: БГУ, 2008. – 443 с.

Zhuravkov M.A., Kologrivko A.A., Konovalov O.L., Galuzo O.G., Romanov D.V.

Geocological safety assessment of the impervious screen exploitation from sludge depository polyethylene film of potash production in the foreseeable load action conditions from sludge and deformations of undermining mining operations

The research results of strength properties of the impervious screen from a polyethylene film of the reconstructed sludge depository northern card of the fourth mining administration of JSC "Belaruskali" and the practical recommendations on its use providing geocological safety during construction and exploitation of the sludge depository are given in the article. The results of model studies of rock mass performance at a site of the reconstructed sludge depository are interpreted. The assessment of geocological safety of the use of the impervious screen from a polyethylene film in the foreseeable load action conditions from sludge and deformations from undermining of the Second and Third potash horizons during operation of the sludge depository northern card is given in the article.

Поступила в редакцию 03.08.2016 г.