

**по проекту VIII.73.1.6.** Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности акватории моря Лаптевых и прилегающих районов континентального сектора Сибирской платформы (научный руководитель чл.-к. РАН А.Ф. Сафронов) **программы VIII.73.1.** Проблемы региональной геологии, седиментологии, органической геохимии и нефтегазоносности осадочных бассейнов Сибири и акватории Северного Ледовитого океана (координаторы чл.-к. РАН В.А. Конторович, чл.-к. РАН А.Ф. Сафронов).

Получены следующие результаты:

Ретроспективный историко-генетический анализ эволюции разновозрастных пассивных континентальных окраин позволил в свое время выделить стадии их развития: рифтовая, пассивноокраинная, коллизионная и постколлизионная (Сафронов, 1987). Проведенный в рамках госбюджетного проекта анализ геологического строения и истории геологического развития ряда современных пассивных континентальных окраин (Бенгальский залив, залив Карпентария – Новая Гвинея, Гвинейский залив, Лаптевоморская пассивная континентальная окраина) с позиций историко-генетического анализа позволил сделать вывод о том, что в цикле их развития четко выделяются обозначенные ранее стадии.

В соответствии принятой стадийностью на современном уровне развития земной коры - континентальная окраина Бенгальского залива находится на постколлизионной стадии, залива Карпентария – на коллизионной, Нигерийская и Лаптевоморская – на пассивноокраинной стадии.

На основе обобщения анализа показателей нефтегазоносности и современных научных представлений, намечены основные направления первоочередных геологоразведочных работ на нефть и газ, разработаны конкретные рекомендации по отдельным участкам недр изученной территории.

Исходя из имеющейся геологической картины и современных научных представлений, намечены основные направления первоочередных геологоразведочных

работ на нефть и газ, разработаны конкретные рекомендации по отдельным участкам изученной территории.

**По проекту VIII.73.2.4.** «История формирования и эволюции нефтегазоносных систем в Виллюйском рифтогенном осадочном бассейне» (научный руководитель: к.г.-м.н. Чалая О.Н.) **Программы VIII.73.2.** Основы теории нефтидогенеза, история формирования и эволюции нефтегазовых систем в докембрии и фанерозое (координаторы: ак. А.Э. Конторович, д.г.-м.н. Л.М. Бурштейн).

Проведены геохимические исследования РОВ верхнелейасовых отложений Виллюйского рифтогенного бассейна, направленные на выяснение специфики состава гумито-сапропелитового РОВ этих отложений и на оценку масштабов возможной генерации жидких и газообразных УВ материнскими породами этих отложений Виллюйского бассейна с позиций историко-генетического анализа процессов нефтегазообразования для отдельных геологических периодов на разных этапах катагенеза с различным соотношением керогенов II и III типов.

Аналитические исследования включали определение в породах содержания Сорг, горячую экстракцию битумоидов из пород хлороформом, определение группового компонентного состава, изучение химической структуры хлороформенных битумоидов (ХБ) и их фракций методом ИК-спектроскопии, изучение насыщенных УВ методами ГЖХ и хроматомасс-спектрометрии. Состав и химическая структура ХБ, генерированных смешанным РОВ верхнелейасовых отложений с различным по разрезу и площади соотношением сапропелевой и гумусовой составляющих, изучены в интервале шкалы катагенеза ОВ от МК<sub>1</sub> до МК<sub>3</sub>.

В результате выполнения проекта построена ретроспективная модель истории геологического развития пермских и нижнеюрских отложений Виллюйской синеклизы.

На основе комплексного использования материалов глубокого бурения и данных сейсморазведки построены структурные карты пермских и нижнеюрских отложений для разных стратиграфических уровней – как основных нефтематеринских интервалов Виллюйской системы позднепалеозойско-раннемезозойское время.

На основе систематизации геологических и геохимических данных по результатам пространственно-временного моделирования построена карта перспектив нефтеносности (рисунок 1). Перспективы нефтеносности изучаемой территории связываются с унаследованными структурными элементами: Сунтарский свод, Якутское поднятие и Мунский свод.

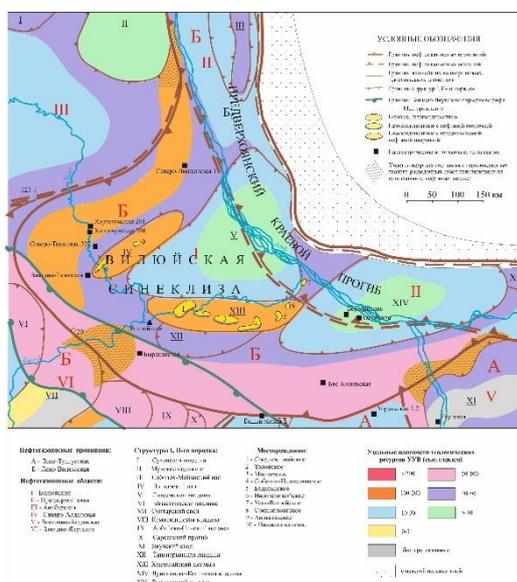


Рисунок 1 - Карта перспектив нефтегазоносности с приведением первоочередных участков на проведение ГРП на нефть

С позиций историко-генетического анализа процессов нефтегазообразования в Вилюйском осадочном бассейне выполнена оценка нефтегенерационного потенциала смешанного РОВ пород верхнелейасовых отложений с различным соотношением керогенов II и III типов на разных грациях катагенеза. В конце меловой седиментации в главной зоне генерации нефти находилось 2,819 тыс.км<sup>3</sup> верхнелейасовых отложений. Показано, что масса керогена, вовлекаемого в процессы нефтегазобразования, могла составлять от 115,5 до 122,8 млрд тонн в зависимости от соотношения керогенов II и III типов в составе исходного ОВ (рисунок 2).

В течение временного периода от завершения юрской седиментации до окончания мелового периода (порядка 100 млн. лет) гумусово-сапропелевое ОВ верхнелейасовых отложений могло генерировать от 7,6 до 10,1 млрд тонн нефти.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке перспектив нефтегазоносности верхнепалеозойско-мезозойских отложений Виллюйского рифтогенного осадочного бассейна.

### ВИЛЛЮЙСКАЯ СИНЕКЛИЗА

Объём материнских пород - 2,819 тыс.км<sup>3</sup>

**(100% керогена II типа)**

### ВИЛЛЮЙСКАЯ СИНЕКЛИЗА

Объём материнских пород - 2,819 тыс.км<sup>3</sup>

75% керогена II типа + 25% керогена III типа



Рис. 2. Эволюция керогена РОВ нижнеюрских отложений в катагенезе

**По проекту VIII.73.4.4. Геологические и термодинамические условия формирования и сохранения скоплений гидратов природных газов в земной коре, физико-химические основы методов их разработки (научные руководители: д.т.н., проф. Бондарев Э.А., к.т.н. Шиц Е.Ю.) программы VIII.73.4. Научные основы формирования сырьевой базы традиционных и нетрадиционных источников углеводородного сырья в Сибири в XXI веке (координаторы ак. А.Э. Конторович, чл.-к. РАН В.А. Каширцев)**

**Цель этапа 2016 года**– изучение механизма образования, прогнозирование формирования гидратов и асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) при разработке нефтяных месторождений, расположенных в криолитозоне.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Определение кинетических параметров роста и Р,Т – условий образования ГПГ в водонефтяных эмульсиях и в системах промысловых АСПО парафинистого типа с водой.

2. Разработка рекомендаций по прогнозированию образования смешанных отложений типа гидрат-АСПО и гидрат – нефть в нефтепромысловом оборудовании на месторождениях, расположенных в зоне влияния криолитозоны.

**Объектами исследования** являлись ГПГ, синтезированные в эмульсиях парафинистые Нефть/Н<sub>2</sub>О и АСПО/Н<sub>2</sub>О. Изучение систем осуществлялось на микроуровне- в ячейке калориметра и на макроуровне- в камерах высокого давления. Методом ДСК высокого давления в калориметрической ячейке на микроуровне изучены фазовые переходы гидратов природного газа, синтезированных в системах парафинистые Нефть/Н<sub>2</sub>О и АСПО/Н<sub>2</sub>О. В камерах-реакторах высокого давления на макроуровне изучена кинетика их образования/разложения.

Установлено, что на скорость гидратообразования влияет состав эмульсии: тип дисперсионной среды (АСПО/нефть) и объемное содержание водной фазы.

Установлено, что скорость формирования гидратсодержащей фазы в водонефтяных системах на порядок выше по сравнению с эмульсиями АСПО, которые характеризуются более полным превращением воды в гидратную фазу, по сравнению с водонефтяными эмульсиями (табл. 1)

Таблица 1. Газосодержание гидратов природного газа, синтезированных в системах АСПО/Н<sub>2</sub>О и Нефть/Н<sub>2</sub>О и полученных из дистиллированной воды

Система	АСПО/Н <sub>2</sub> О			Нефть/Н <sub>2</sub> О				Дист. вода
	80/2	60/4	40/6	80/2	60/40	40/60	20/80	
Соотношение	0	0	0	0				-

Объем выделенного газа, см <sup>3</sup>	1420	1100	1180	20	1130	640	380	850
Удельное газосодержание, см <sup>3</sup> /г	160	72	56	4	94	34	15	28,7
Степень превращения воды в гидрат, %	97,5	43,8	34,0	~3,0	57,0	21,0	9,0	17,5

Установлено, что во всех эмульсиях имеется корреляция степени конвертации водной фазы в гидратную со скоростью кристаллизации: чем меньше константа скорости, тем выше степень превращения воды в гидрат. Показано, что низкие степени конвертации воды в гидрат в водонефтяных эмульсиях, по сравнению с эмульсиями АСПО обусловлены меньшей удельной поверхностью раздела фаз между диспергированными каплями воды и нефтью на которой протекает гидратообразование. Установлено, что с уменьшением содержания водной фазы в эмульсии АСПО процесс из диффузионно-кинетического режима переходит в кинетический, и направление роста гидрата в этих системах меняется с латерального на радиальный. Механизм кристаллизации гидратсодержащей фазы водонефтяных эмульсий, независимо от содержания воды, протекает в кинетической области и во всех случаях рост гидрата направлен вглубь диспергированных капель воды. Следует отметить, что для всех исследованных эмульсий наблюдается хорошая корреляция экспериментальных данных, полученных как на микро -так и на макро-уровне.

Исследования Р, Т - условий роста гидратов природного газа в системах парафинистые Нефть/Н<sub>2</sub>О и АСПО/Н<sub>2</sub>О показали, что фактические термобарические условия в забое скважин, расположенных в зоне влияния многолетнемерзлых пород, соответствуют области формирования гидратов природного газа

в этих системах. Показано, что по полученным экспериментальным данным (точки 5-12) и (точки 13–18) определенно можно очертить термобарическую область образования гидратов ПГ в системах парафинистая Нефть/ $H_2O$  и парафинистое АСПО/ $H_2O$  (рис.1). Установлено, что кривая гидратообразования в эмульсиях АСПО (кривая С), по сравнению с гидратообразованием в дистиллированной воде (кривая А), сдвигается в область высоких давлений и низких температур, а кривая гидратообразования в водонефтяных эмульсиях (кривая В) - в область низких давлений и высоких температур. Образование гидратов в эмульсиях парафинистых нефтей, по сравнению с процессом в объемной воде и в системе АСПО/ $H_2O$ , будет наблюдаться при более низких давлениях (рис.1). Следовательно, при прочих равных условиях, гидратообразование наиболее легко будет происходить именно в эмульсиях нефтей.

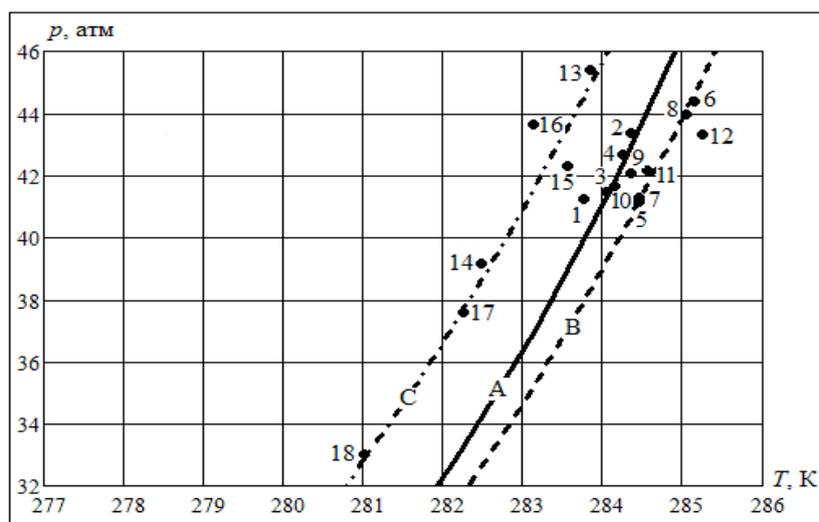


Рис. 1. Сопоставление расчетных (кривые) с экспериментальными (точки) условиями образования гидратов природного газа Средневилюйского месторождения для систем:

1 – дистиллированная вода; 2 – дистиллированная вода + песок; 3 – вода с термической историей; 4 – вода с термической историей + песок; 5,6 – Нефть/ $H_2O$  с соотношением компонентов 80/20; 7,8 – Нефть/ $H_2O$  - 60/40; 9,10 - Нефть/ $H_2O$  – 40/60; 11,12 – Нефть/ $H_2O$  - 20/80; 13, 14 – АСПО/ $H_2O$  - 40/60; 15, 16 – АСПО/ $H_2O$  - 60/40; 17, 18 – АСПО/ $H_2O$  - 80/20; А – равновесная кривая для природного газа;

В – аппроксимация условий для водонефтяных систем (точки 5–12); С – аппроксимация условий для систем АСПО/Н<sub>2</sub>О (точки 13–18)

Таким образом, на всех нефтяных скважинах Лено-Тунгусской НГП, при обводненности парафиновых отложений и/или нефти от 20 до 80 % мас., существует неизбежная угроза образования как смешанных отложений гидратов и АСПО на поверхности нефтепромыслового оборудования, так и формирования гидратов в добываемой нефти.

**Научная новизна** поставленных задач заключается в получении новых экспериментальных данных по термодинамике и кинетике образования гидратов природного газа в эмульсиях различных нефтяных дисперсных систем, что позволило глубже изучить механизм образования ГПГ в этих системах.

**В прикладном значении** полученные результаты являются основой для определения возможности образования совместных пробок гидратов и АСПО при добыче углеводородного сырья и позволяют так же оценить возможность гидратообразования в добываемой скважинной продукции при эксплуатации нефтяных месторождений, расположенных в зоне влияния криолитозоны.

**По Проекту V.45.2.1. Исследование физико-химических особенностей формирования морозостойких композиционных материалов и прогнозирование их долговечности в условиях холодного климата (научный руководитель, д.т.н. С.Н. Попов) Программы СО РАН V.45.2. Химические проблемы создания новых функциональных материалов, наноструктурированных покрытий и композитов для различных областей применения (координатор акад. Н.З. Ляхов)**

**По этапу 1.** Проведение структурных исследований поверхностей трения ПКМ на основе ПТФЭ и СВМПЭ, модифицированных базальтовыми волокнами, терморасширенным графитом, вермикулитом и жидкими смазками, а также поверхностей контртела до и после трибоконтактного взаимодействия с полимерными композитами. Исследование продуктов износа, образующихся при фрикционном контакте полимер - стальное контртело.

Установлено повышение степени кристалличности продуктов износа ПТФЭ и композитов на его основе в 1,4 - 1,5 раза по сравнению с материалом в объеме полимера, что связано с ориентированием структурных элементов материала поверхностных слоев по направлению скольжения. Методом ИК-спектроскопии установлено, что при изнашивании композитов на основе ПТФЭ, модифицированных жидкими смазками, деструкция происходит в меньшей степени по сравнению с исходным полимером. Выявлена взаимосвязь между интенсивностью кислородсодержащих групп на поверхности трения и износостойкостью наполненных композитов: чем выше интенсивность этих групп, тем более износостойким является композит. Установлено, что повышение износостойкости композитов на основе СВМПЭ связаны не только с процессами структурообразования при введении наполнителей, но и с обратным переносом частиц износа на поверхность материала, т.е. с процессами «самозалечивания» композита.

Для установления взаимосвязи между износостойкостью и изменением структуры поверхностей трения полимерных композитов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с учетом характера продуктов износа проведены триботехнические исследования композитов в зависимости от концентрации базальтовых волокон (БВ). Испытания проведены на машине трения ИИ-5018 (нагрузка 200 Н, скорость скольжения 0,5 м/с, путь трения 450 м. Контртело – диск из стали 45 с твердостью 45-50 HRC). Показано, что с увеличением концентрации наполнителя от 1 до 10 мас.% повышается износостойкость, и соответственно, площадь истираемой поверхности на полимерном композите уменьшается (рис.1, 2).

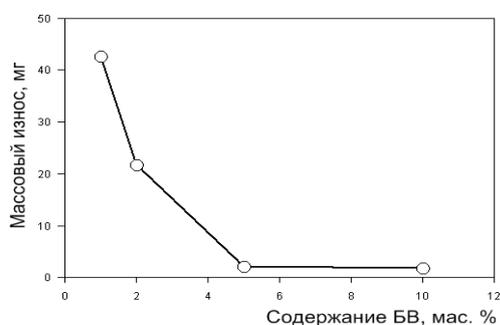


Рис. 1. Значения массового износа в зависимости от содержания БВ

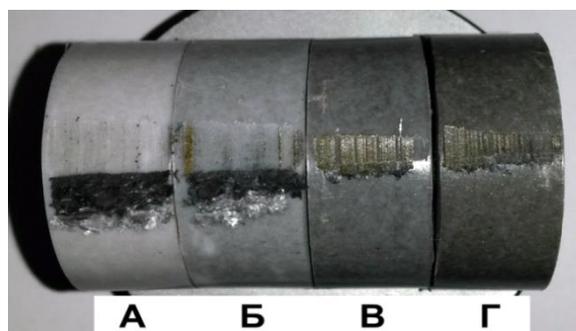


Рис. 2. Площадь контакта после испытаний образцов ПТФЭ, содержащих БВ: А –

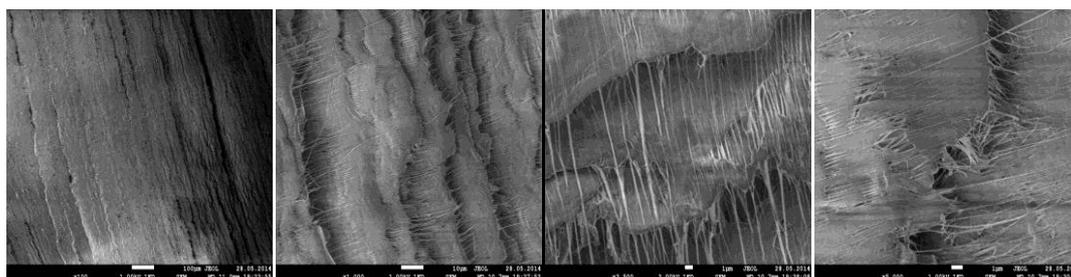
1 мас. %; Б – 2 мас. %; В – 5 мас. %; Г – 10 мас. %

Зарегистрирована неоднородность характера продуктов износа композитов в зависимости от концентрации БВ. Установлено, что на начальной стадии трения происходит образование светлых продуктов изнашивания с последующим изменением их оттенка на более темный, что хорошо видно при трении малонаполненных композитов (1 и 2 мас.%). Это связано с тем, что в первую очередь в результате сдвиговых напряжений и деформаций в процессе трения с композита удаляется слой полимера в виде светлой пленки переноса или продукта износа, а частицы наполнителя пока остаются закрепленными в матрице. Только после этого в процесс трения вовлекаются частицы наполнителя, имеющие темный цвет. Темные продукты износа содержат частицы БВ и контртела, что свидетельствует об абразивном характере действия БВ на стальное контртело. Как показано на рис.2 продукты износа частично поглощены фторопластом без разрушения рабочей поверхности. Продукты износа у композитов с содержанием 1 и 2 мас.% имеют форму хлопьев, с повышением концентрации БВ в полимере размеры частиц износа уменьшаются с сохранением хлопьевидной формы.

Установлено, что степень кристалличности продуктов износа в 1,4 - 1,5 раза увеличивается по сравнению с материалом в объеме полимера. Это связано с тем, что при трении происходит ориентирование структурных элементов материала поверхностных слоев по направлению вращения вала, а затем из этих анизотропных упорядоченных слоев формируется пленка на контртеле, которая удаляется из зоны трения в виде продуктов износа или частично обратно поглощается полимерным композитом, т.е. наблюдается обратный перенос продуктов износа с поверхности контртела на поверхность образцов (рис. 2).

Из-за слабой адгезии ПТФЭ к контртелу пленка переноса формируется не сплошной, а состоящей из отдельных фрагментов, которые легко уносятся из зоны трения в виде крупных чешуек вытянутой формы до 300-400 мкм в длину и примерно до 1 мкм в толщину, которые плотно уложены друг на друга (рис.3), т.е. имеют слоистую структуру. При большом увеличении на микрофотографиях

частиц износа видно множество нитевидных образований, что свидетельствует о вытягивании фибрилл макромолекул ПТФЭ в процессе трения.



X 300

X1000

X3500

X5000

Рис. 3. Продукты износа ПТФЭ со стороны трения при разных увеличениях

Исследование поверхностей контртела, контактировавшего с композитами ПТФЭ, модифицированными моторными маслами, показало, что в процессе трения формируется также не сплошная пленка переноса, а состоящая из отдельных вытянутых по направлению скольжения фрагментов, при этом площадь покрываемой поверхности больше. Вследствие повышения адгезионного взаимодействия частиц износа с металлическим контртелом, формируется прочная пленка переноса, которая не уносится из зоны трения, в результате чего износостойкость масломодифицированных композитов повышается до 1000 раз по сравнению с исходным полимером. Образование продуктов износа масломодифицированных композитов происходит в виде мелкой пыли и очень в малом количестве.

Методом ИК-спектроскопии установлено, что при изнашивании композитов на основе ПТФЭ, модифицированных жидкими смазками, деструкция происходит в меньшей степени по сравнению с исходным полимером, о чем свидетельствует высокая интенсивность полос поглощения материала пленки переноса композита в области  $1230$  и  $1150$   $\text{см}^{-1}$  (рис.4).

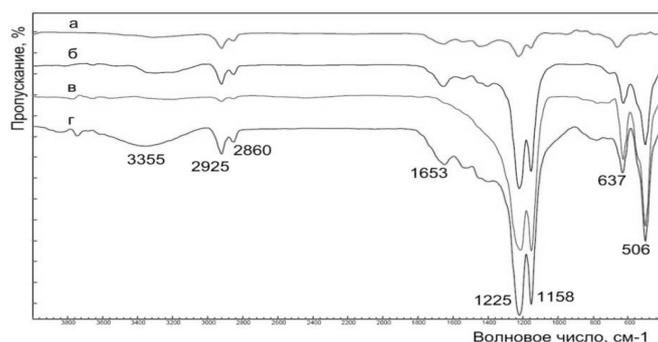


Рис.4. ИК-спектры пленок переноса на контртеле: а) исходный ПТФЭ; б) композит, модифицированный смесью масел; в) – маслом Castrol; г) – маслом Eneos

На ИК-спектрах поверхностей трения масломодифицированных композитов и композитов с БВ зарегистрированы дополнительные пики в области  $3600-3000\text{ см}^{-1}$ ,  $1650\text{ см}^{-1}$ ,  $1430\text{ см}^{-1}$ ,  $900-915\text{ см}^{-1}$  (только у композитов с БВ) (рис.5), относящиеся к валентным и деформационным колебаниям ОН-групп, а также к карбонильной группе.

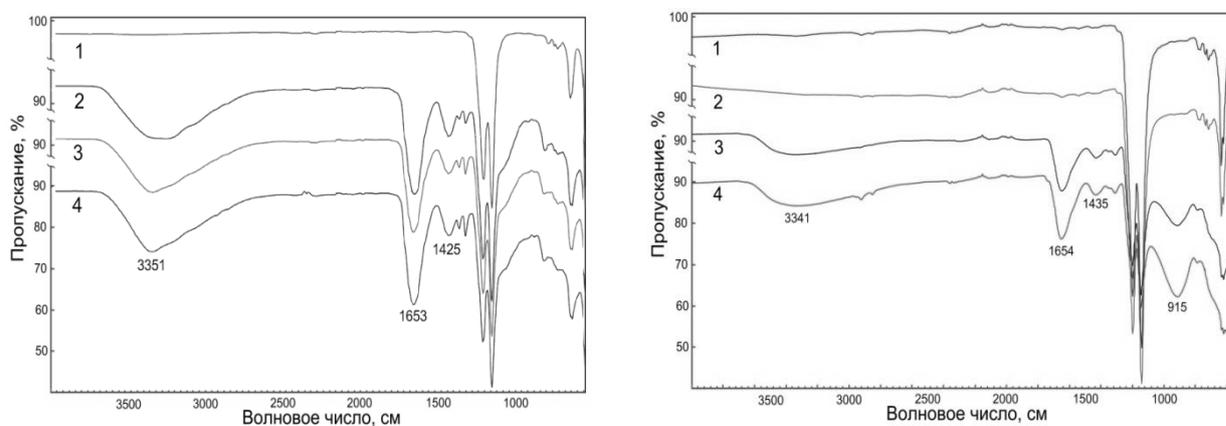


Рис.5. ИК-спектры поверхностей трения композитов, модифицированных отработанными моторными маслами (а) и БВ (б).

При этом выявлено, что чем меньше композит подвержен изнашиванию, тем выше содержание этих групп на поверхностях трения композитов. Наличие на поверхностях трения кислородсодержащих соединений приводит к формированию прочно закрепленной пленки переноса, вследствие повышенной адгезии перенесенного слоя материала к контртелу, и является причиной высокой износостойкости композитов.

Известно, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и композиты на его основе обладают высокими прочностными характеристиками, износостойкостью, морозостойкостью, однако из-за невысокой термостойкости максимальная температура длительной эксплуатации без смазки не превышает 80-100 °С. В связи с этим, допустимые нагрузочно - скоростные режимы эксплуатации композитов следующие: нагрузка - 200 Н, скорость скольжения - 0,5 м/с. При таком нагрузочно-скоростном режиме трения по данным ИК-спектроскопии поверхностей трения не происходят процессы окислительной деструкции. Однако, при этом из-за высокой износостойкости материала образование продуктов износа происходит в очень малом недостаточном для тщательных исследований количестве. Поэтому для исследования продуктов износа условия трения были ужесточены: нагрузка 300 Н, скорость скольжения 2,5 м/с. На ИК-спектрах продуктов износа появляются пики средней интенсивности в областях  $\sim 1740 \text{ см}^{-1}$ ,  $1060 \text{ см}^{-1}$ ,  $950 \text{ см}^{-1}$ ,  $876 \text{ см}^{-1}$ , связанные с усилением линий С-О и процессами окислительной деструкции.

Установлено, что степень кристалличности продуктов износа повышается на 18-25% по сравнению с материалом композита. Следует отметить, что даже при таких условиях износ материала небольшой. Это, вероятно, связано с тем, что из-за высокой температуры в зоне трибоконтакта образуемые частицы износа, не успевая выйти из зоны трения, поглощаются полимерным композитом за счет быстропротекающего процесса подплавления матрицы. Протекание подобного процесса происходит даже при нагрузке 200 Н и скорости скольжения 0,5 м/с (рис. 6).

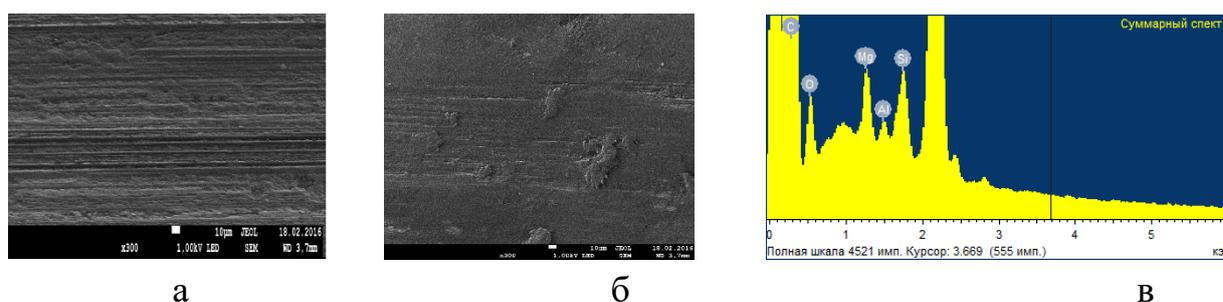


Рис.6. Поверхность трения: а) СВМПЭ; б) СВМПЭ+2 мас. % вермикулита; в) элементное распределение композита на поверхности трения

Поверхность трения композита с вермикулитом (рис.6, б) характеризуется более сглаженным микрорельефом и на ней зарегистрированы поглощенные обратно поверхностью частицы износа, что подтверждено исследованиями элементного анализа этих фрагментов (рис. 6, в). Подобный процесс «самозалечивания» композита приводит к повышению износостойкости до 3,5 раз по сравнению с исходным композитом.

**Научная новизна.** Установлено, что степень кристалличности продуктов износа композитов на основе ПТФЭ в 1,4 - 1,5 раза больше по сравнению со степенью кристалличности материалов до трения. Выявлена взаимосвязь между интенсивностью кислородсодержащих групп на поверхности трения и износостойкостью композитов: чем выше интенсивность этих групп, тем более износостойким является композит. Повышение износостойкости композитов на основе СВМПЭ связаны не только с процессами структурообразования при введении наполнителей, но и с обратным переносом частиц износа на поверхность материала, т.е. с процессами «самозалечивания» композита.

**Практическая значимость.** Разработаны полимерные композиты триботехнического назначения.

**Этап 2.** Исследование влияния механоактивированных в планетарных мельницах (АГО-2, Россия и «Fritsch», Германия) нанонаполнителей природного (цеолит) и синтетического (шпинель магния, ТРГ, анортит) происхождения на прочностные, триботехнические, агрессивно- и морозостойкие свойства полимерэластомерных композитов на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18 и СВМПЭ. Проведение стендовых испытаний в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации резиновых уплотнений, и опытно-промышленные испытания уплотнений из разработанных полимерэластомерных материалов в узлах машин и механизмов техники ведущих предприятий РС(Я).

Установлено, что модификация полимерэластомерных композитов на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18 и СВМПЭ механоактивированными наполнителями приводит к повышению комплекса технических свойств, что можно объяснить локализацией наполнителей на границе раздела фаз, приводящей к усилению взаимодействия системы «БНКС-18-СВМПЭ» на межфазной границе. Проведены стендовые испытания триботехнических свойств разработанных резин на машине трения ИИ 5018 в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации резиновых уплотнений (нагрузка, скорость вращения вала, рабочая среда). Уплотнения из разработанных материалов успешно прошли опытно-промышленные испытания на предприятиях промышленного комплекса РС (Я). Получено 2 акта внедрения уплотнений из разработанных полимерэластомерных материалов.

Показано, что в случае применения механоактивации наполнителей для модификации полимерэластомерных композитов уровень упругопрочностных, морозо-, износо-, маслостойких свойств выше, чем при использовании неактивированных наполнителей (табл.1). Улучшение свойств можно объяснить концентрированием частиц механоактивированных наполнителей на границе раздела фаз полимеров. Методом электронной сканирующей микроскопии с рентгеноспектральным анализом зарегистрировано появление пика магния и алюминия, основных элементов в составе шпинели магния и цеолита на границе раздела полимерных фаз. Такое локальное распределение активированных частиц наполнителя обеспечивает интенсификацию взаимодействия на границе раздела фаз «каучук - термопластичный полимер» с образованием развитого межфазного слоя и позволяет получить эластомерные материалы с повышенным комплексом свойств. Кроме того, выявлено, что чем выше удельная геометрическая поверхность частиц наполнителя, тем выше их концентрация на межфазной границе «СВМПЭ – каучук».

Таблица 1

Физико-механические свойства резин, модифицированных цеолитами

Резина на основе БНКС-18	$f_{100}$ , МПа	$f_p$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	Q, % В И-50А	$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	$K_m$ - 45° С
В-14	4,7	11,6	215	-3,23	0,218	0,57
В-14+10%(СВМПЭ+2%неак.цеолит)	7,2	9,8	223	-2,96	0,183	0,61
В-14+10%(СВМПЭ+2%неак.шп.Мg)	6,7	10,8	231	-2,91	0,163	0,64
Activator 2S, активация в течение 2 мин						
В-14+10%(СВМПЭ+2%цеолит)	7,3	10,5	250	-2,82	0,151	0,69
В-14+ 10%(СВМПЭ+2%шп.Мg)	6,8	12,7	248	-2,73	0,139	0,67
«Пульверизетте-5», активация в течение 4 мин						
В-14+ 10%(СВМПЭ+2%цеолит)	7,1	11,6	240	-2,83	0,149	0,66
В-14+ 10%(СВМПЭ+2%.шп.Мg)	7,1	12,6	256	-2,73	0,134	0,71

Примечание:  $f_{100}$ , МПа – условное напряжение при 100% удлинении;  $f_p$ , МПа – условная прочность при разрыве;  $\varepsilon_p$ , %- относительное удлинение;  $\Delta Q$ , %- степень набухания в масле И-50А;  $\Delta V$ , см<sup>3</sup> – объемный износ при абразивном истирании;  $K_m$  -45° С- коэффициент морозостойкости при растяжении.

Стендовые испытания проводились на машине трения ИИ 5018 (рис. 7), для которых выбран режим, имитирующий условия работы гидравлических систем по схеме "вал - колодка": вращение 1000 об/мин (2,6 м/с); усилие прижима образца - 50Н; температура испытания – комнатная (16,8 °С); рабочая среда – индустриальное масло И-50А; время испытаний – 5 часов; расчетные величины: массовый износ, линейный износ. Термопары размещали в одной точке на образце, вблизи зоны трения. Исследуемый образец представляет собой колодку, вырезанную из кольца прямоугольного сечения (60x80x10), контртело - стальной вал (сталь марки 40Х, термообработанная до HRC 50+/-1). Принцип действия машины заключается в истирании действия пары испытываемых образцов, прижатых друг к другу силой Р.

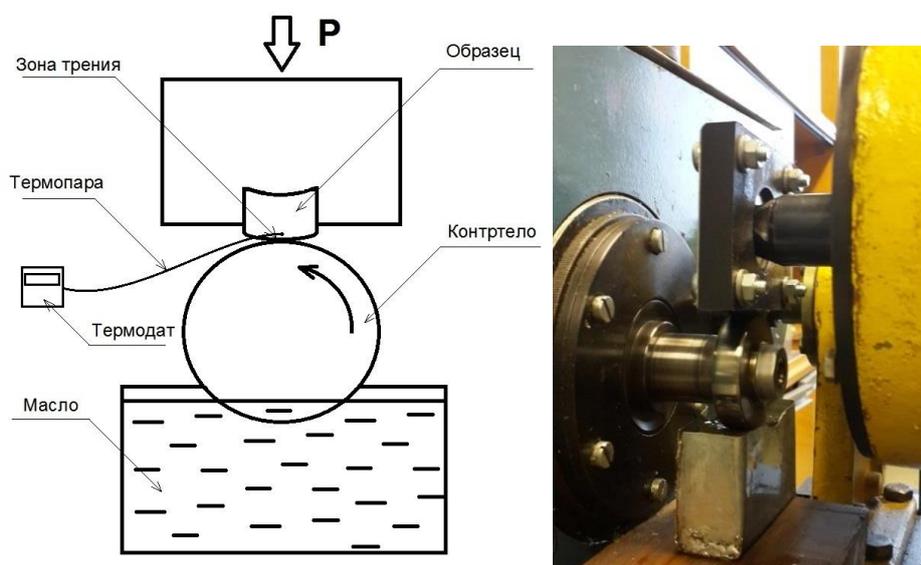


Рис. 7 - Триботехническое испытание уплотнений на машине трения ИИ5018 а) схематическое изображение б) процесс трения

Результаты исследования показали (табл.2), что разработанные полимерэластомерные композиты с активированными наполнителями имеют улучшенные триботехнические свойства в условиях, приближенных к эксплуатации гидравлических промышленных систем: снижение массового износа составляет 28%, линейного - 68%, температуры в зоне трения на 31,7 °С по сравнению с исходной резиной и композитами с неактивированными наполнителями.

Таблица 2

## Результаты триботехнических испытаний резина на основе БНКС-18

Резина на основе БНКС-18	Массовый износ, $\Delta m(\text{г})$	Линейный износ, $\Delta L(\text{мм})$	Максимальная температура в зоне трения, °С
В-14	0,0049	0,0528	65,2
В-14+10%(СВМПЭ+2%неак.цеолит)	-0,061	-0,087	52,3
В-14+10%(СВМПЭ+2%неак.шп.Мg)	0,0052	0,0740	75,2
<b>Activator 2S, активация в течение 2 мин</b>			
В-14+10%(СВМПЭ+2% цеолит)	0,0029	0,0237	33,7
В-14+ 10%(СВМПЭ+2% шп.Мg)	0,0029	0,0340	36,1
<b>«Пульверизетте-5», активация в течение 4 мин</b>			
В-14+ 10%(СВМПЭ+2% цеолит)	0,0042	0,0293	33,5
В-14+ 10%(СВМПЭ+2%.шп.Мg)	0,0047	0,0440	37,3

Снижение температуры в зоне трения можно объяснить образованием более устойчивой масляной пленки между контртелами и интенсификацией теплоотвода из зоны трения.

Исследования поверхности образцов после трения на оптическом микроскопе МБС-10 показали (рис. 8), что резины, содержащие активированную в «Активатор-2S» шпинель магния, имеют более сглаженный микрорельеф, чем у

других исследованных резин. Граница трения у этого образца более смыта, что также свидетельствует о наименьшем протекании процесса износа при испытании на машине И5018. Полученные данные сопоставимы с показателями массового и линейного износа образцов резин. Аналогичные результаты получены и у резин с цеолитом.

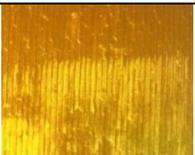
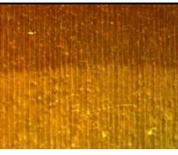
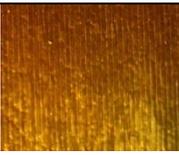
В-14	Шп. Mg неакт	Шп. Mg актив. в «Активатор 2S»	Шп. Mg актив. В «Пульв-р 5»
			
Поверхность образцов после трения			
			
Граница трения образцов после испытаний			

Рис. 8. Электронно-микроскопические исследования поверхности образцов резин после трения

**Научная новизна.** Установлено улучшение комплекса физико-механических свойств полимерэластомерных материалов, содержащих механоактивированные наполнители за счет повышенного концентрирования их частиц на границе раздела полимерных фаз, что обуславливает усиление системы «БНКС-18-СВМПЭ». Выявлено, что чем выше удельная поверхность дисперсных частиц, тем больше их концентрация на межфазной границе полимеров.

**Практическая значимость.** Модифицированные полимерэластомерные материалы успешно прошли стендовые испытания на машине И5018 в режиме, имитирующей условия работы гидравлических систем. Получено 2 акта внедрения от газоперерабатывающего завода АО «Сахатранснефтегаз» (г. Якутск) и топливо-заправочной компании ООО "ПАРИТЕТ" (г. Якутск). Уплотнения из

разработанных резин имеют срок службы в два-три раза превышающий срок службы штатных уплотнений.

**Этап 3.** Разработка технологии производства и рекомендаций по использованию высокопрочных бетонных смесей, модифицированных механоактивированными добавками, в дорожном строительстве для условий Севера.

Показана перспективность применения для строительства автомобильных дорог в северных условиях в основаниях дорожных одежд тощих бетонных смесей, содержащих механоактивированные добавки песка и цеолита, обеспечивающих за счёт повышения прочностных характеристик увеличения межремонтных сроков эксплуатации. Разработаны конструкции дорожных одежд с основаниями из тощих бетонов и рекомендации по их сооружению.

Проведенными ранее исследованиями разработаны составы модифицированных минеральными механоактивированными добавками (песок, цеолит) тощих бетонных смесей и материалов на их основе с прочностью до 20 МПа и морозостойкостью не менее F300. Данные бетоны рекомендованы для устройства оснований под асфальтобетонные покрытия и обеспечивают повышенную трещиностойкость асфальтобетонного покрытия, высокую деформативность дорожной одежды и сопротивляемость жестким климатическим условиям холодного климата и многолетнемерзлых грунтов.

Был произведен расчет дорожной одежды с основаниями из легкоуплотняемого щебня фракции 40-80 мм с заклинкой фракционированным мелким щебнем и тощего бетона В10 для дороги III технической категории с приведенной интенсивностью движения 2000 авт/сут и расчетным сроком службы покрытия 15 лет. При этом в качестве верхнего слоя земляного полотна был использован крупный песок и гравийные (щебеночные) смеси непрерывной гранулометрии – для нижнего слоя основания дорожной одежды.

Результаты расчета дорожной одежды показали, что для обеспечения несущей способности при приложении расчетных нагрузок на дорожную одежду в случае использования оснований из тощих бетонов общая толщина дорожной одежды снижается на 11 см, из них: на 9 см первый слой основания, на 1 см – несущий

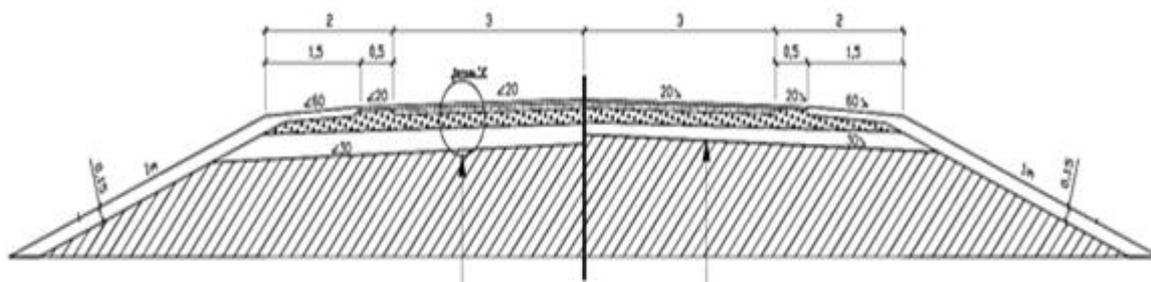
А		Б	
Верхний слой земляного полотна – песок крупный			
Песчано-гравийная смесь		Песчано-гравийная смесь	
- 0,24 м		- 0,15 м	
Щебень (40-80 мм) с заклиной		Тощий бетон	
- 0,18 м		- 0,17 м	
Асфальтобетон пористый, тип Б, марка П		- 0,06 м	
Асфальтобетон высокоплотный, тип Б, марка П		Асфальтобетон высокоплотный	
- 0,05 м		- 0,04 м	

слой основания и на 1 см – верхний слой асфальтобетонного покрытия (рис. 9).

Экономичность дорожных одежд с основаниями из тощего бетона обеспечивается не только за счет экономии каменных материалов, цемента и битума, но и за счет простоты технологии производства работ и возможности устройства вышележащих конструктивных слоев дорожной одежды без технологического

Рис. 9. – Дорожная одежда

А – с основанием из щебня; Б – с основанием из тощего бетона



перерыва.

**Научная новизна:** установлено преимущество использования модифицированных тощих бетонов в основаниях дорожных одежд для увеличения работоспособности и долговечности автомобильных дорог, эксплуатирующихся в сложных грунтово-климатических условиях Севера.

**Практическая значимость:** разработаны рекомендации по строительству оснований дорожной одежды из модифицированных тощих бетонных смесей, включающие технологический регламент на производство модифицированных смесей и требования к содержанию строительных работ.

**Этап 4.** Определить технологические параметры приварки седлового отвода с закладным нагревателем к полиэтиленовой трубе при температурах окружающего воздуха ниже нормативных.

На основе численного моделирования теплового процесса в ортогонально пересекающихся трубах с локальным источником теплоты разработана методика определения технологических параметров приварки седловых отводов с закладным нагревателем к полиэтиленовым трубам газопроводов в условиях низких климатических температур. Установлено, что приварка седлового отвода к полиэтиленовому газопроводу при температурах окружающего воздуха (ОВ) ниже нормативных с предварительным подогревом и охлаждением под слоем теплоизоляции позволяет получить динамику температурного поля, при которой формируется качественное сварное соединение.

В технологии сварки полиэтиленовых труб нагретым инструментом встык при температурах воздуха ниже нормативных ключевым является определение технологических параметров сварки труб на основе моделирования теплового процесса [1-2]. При такой стыковой сварке простота формы соединения позволяет при расчете температурного поля использовать метод конечных разностей, который не столь эффективен для тел сложной формы, каковым является сварное соединение седлового отвода к полиэтиленовой трубе. Расчетная область при приварке седлового отвода к трубе представляется в виде двух ортогонально пересекающихся труб с локальным источником теплоты. В такой области тепловой расчет удобнее проводить методом конечных элементов (МКЭ). Поскольку

большинство известных комплексов программ, реализующих МКЭ, в том числе ABAQUS, ANSYS и другие, являются коммерческими продуктами с закрытым исходным кодом и ограниченными возможностями расширения, для определения температурных полей приварки седлового отвода к трубе использовалась программа свободного доступа Dolfin/FEniCS [3]. Основным достоинством FEniCS-а является простая формулировка вариационного уравнения, близкая к математическим обозначениям и возможность задания коэффициентов дифференциального уравнения в виде функций. Это позволяет при моделировании теплового процесса учитывать скрытую теплоту фазового перехода в интервале температур [4]. Доля твердой фазы полиэтилена, необходимая для определения зависимости количества выделившейся (поглощенной) теплоты от температуры, определялась с использованием данных, полученных методом дифференциальной сканирующей калориметрии [5].

На рис. 10. представлена расчетная модель трубы с седловым отводом.

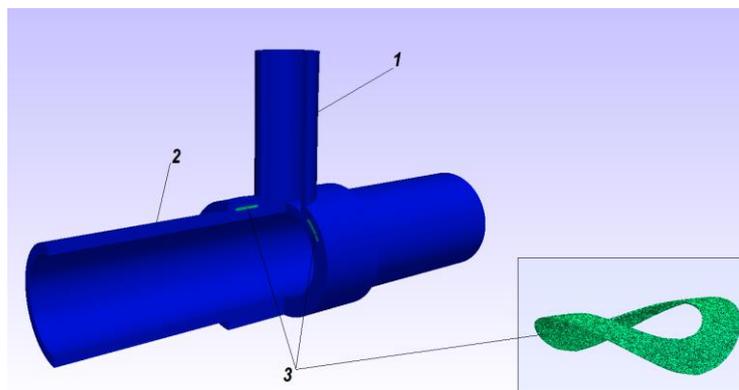


Рис.10. Расчетная модель: 1 – седловой отвод, 2 – труба, 3 – нагревательный элемент

Сопоставлением расчетных и экспериментальных временных температурных зависимостей в множестве точек установлена адекватность математической модели реальному тепловому процессу приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе. На рис. 11 представлены сопоставление расчетных и экспериментальных временных зависимостей температуры при приварке седлового отвода с предварительным подогревом и охлаждением с теплоизоляцией.

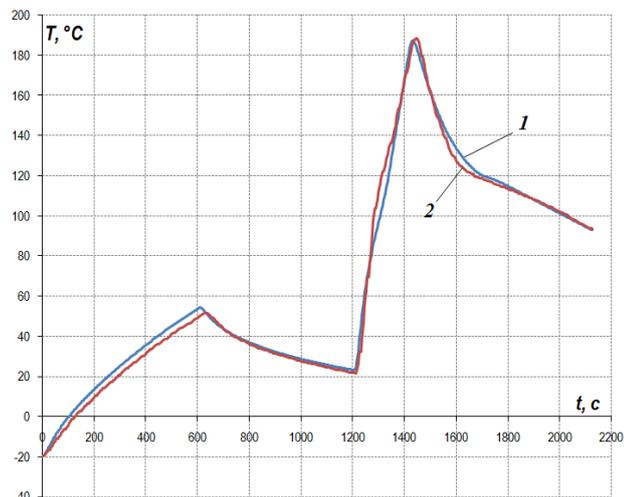


Рис.11. Сопоставление экспериментальных (кривая 2) и расчетных (кривая 1) зависимостей температур в точке под нагревательным элементом на расстоянии 2 мм от внешней поверхности трубы по времени при приварке седлового отвода с предварительным подогревом и охлаждением с теплоизоляцией при температуре воздуха  $-20^{\circ}\text{C}$

На рис. 12 представлена изотермическая поверхность  $T=80^{\circ}\text{C}$  в момент охлаждения  $t=13,5$  минут при температуре ОВ  $20^{\circ}\text{C}$ , показывающая неравномерность распределения температуры вокруг вертикального отвода.

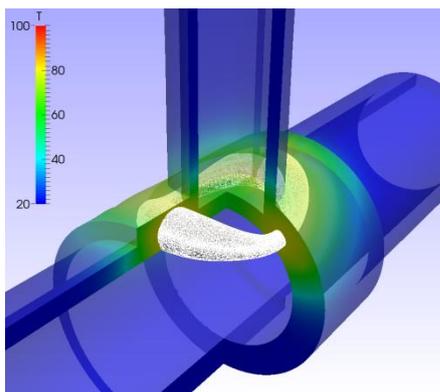


Рис.12. Изотермическая поверхность  $T=80^{\circ}\text{C}$  в трубе и седловом отводе в момент охлаждения  $t=13,5$  минут при температуре ОВ  $20^{\circ}\text{C}$

На рис.13. представлено сравнение размеров оплавленной зоны в верти-

кальном сечении при сварке при различных температурах ОВ в момент завершения нагрева согласно существующего режима приварки седлового отвода 110/63 к полиэтиленовой трубе ПЭ100 диаметром 110, SDR 11 (подаваемое в нагревательный элемент напряжение 39,6 В, время нагрева 210 секунд). Меньший размер оплавленной зоны при низкой температуре ОВ свидетельствует о меньшем объеме полученного расплава, следствием которого будет недостаточное давление свариваемых поверхностей, более интенсивная кристаллизация и формирование мелкой структуры материала сварного шва и т.д., приводящие к низкому значению прочности соединения. Результаты расчета показывают необходимость предварительного подогрева при сварке в условиях низких температур. Расчетами также установлена необходимость использования теплоизоляции на стадии охлаждения сварного соединения.

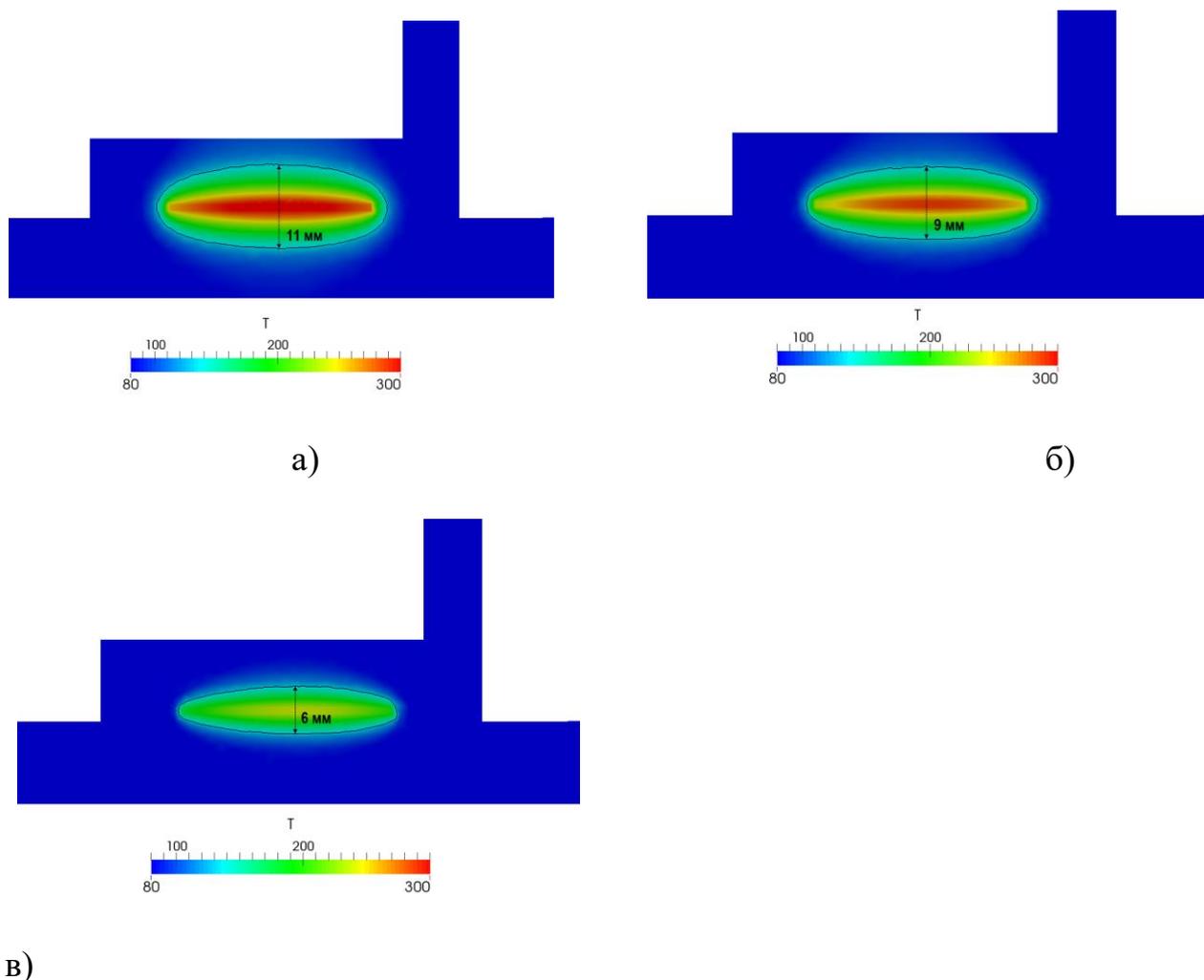


Рис. 13. Изотермы 130 °С в сечении седлового отвода и трубы вертикальной плоскостью в момент завершения нагрева ( $t=210$  с) при температуре ОВ: а) 20 °С; б) 0 °С; в) -40 °С

Вычислительными экспериментами установлено, что варьируя следующими технологическими параметрами приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе: подаваемое в нагревательный элемент напряжение для подогрева, продолжительность подогрева и продолжительность охлаждения для выравнивания температур, толщина теплоизоляционного слоя при охлаждении, можно обеспечить протекание теплового процесса приварки при низких температурах по закономерностям, характерным сварке при допустимых температурах.

Технологические параметры приварки седлового отвода при температурах ниже нормативных к полиэтиленовой трубе определяются таким образом, чтобы изменение температурного поля в зоне термического влияния происходило как при допустимой температуре воздуха из интервала  $(-15, 45) \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определение таких параметров сводится к минимизации функционала, характеризующего меру уклонения температур в зоне термического влияния при приварке в условиях низких и допустимых температур воздуха, методом варьирования параметрами. Разработана методика определения технологических параметров приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе при температурах воздуха ниже нормативных.

Для приварки седлового отвода 110/63 к полиэтиленовой трубе  $\varnothing 110$  для газопровода ПЭ 100 SDR 11 при температуре воздуха  $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  расчетами определены следующие технологические параметры:

- толщина теплоизоляционного слоя при охлаждении - 2 см;
- Напряжение источника теплоты для подогрева – 17 В;
- продолжительность подогрева – 12 минут
- продолжительность технологической паузы для выравнивания температур - 4 минуты.

Указанные технологические параметры обеспечивают в зоне термического влияния допустимый температурный режим приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе. На рис. 14 представлено распределение температуры в седловом отводе и трубе с теплоизоляцией при температуре окружающего воз-

духа  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в конце выравнивания температуры. При таком распределении температуры возможно проведение приварки по регламентированному режиму для допустимых температур воздуха.

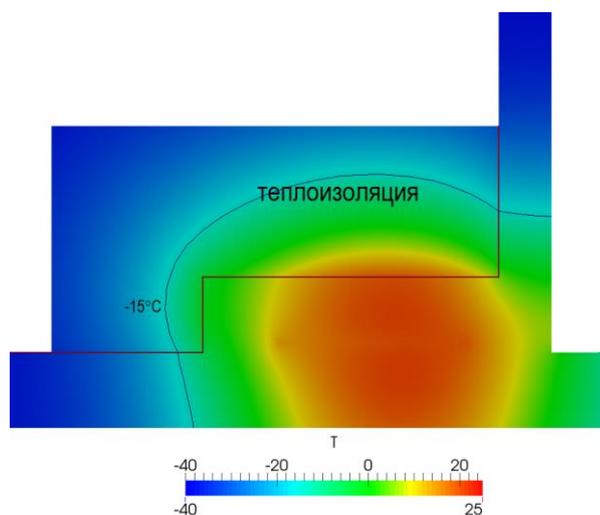


Рис. 14. Распределение температуры в сечении седлового отвода и трубы с теплоизоляцией при температуре ОВ минус  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  после предварительного подогрева в течении 12 минут

На рис. 15. представлено изменение во времени температуры при приварке седлового отвода при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  с расчетными технологическими параметрами и при стандартной сварке в условиях допустимой температуры  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в точке между седловым отводом и трубой. Подобная близость временных зависимостей сохраняется и в других точках зоны термического влияния.

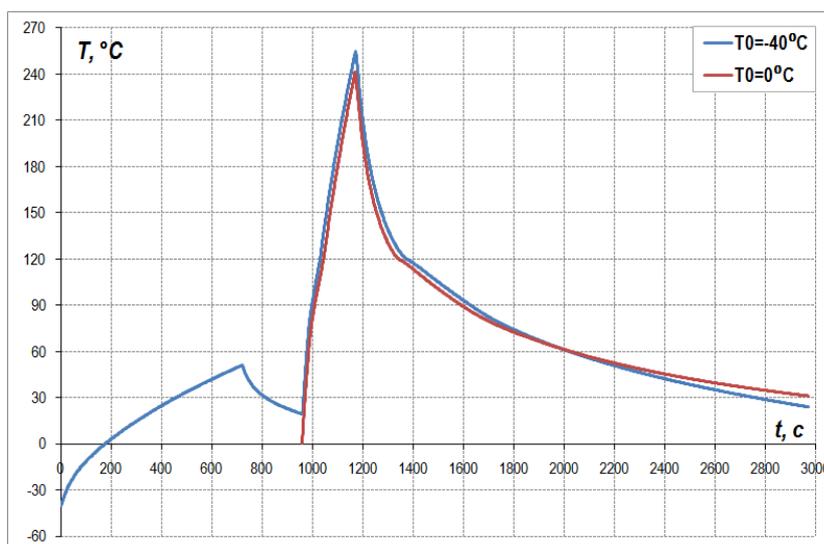


Рис. 15. Изменение температур по времени при приварке седлового отвода при температурах воздуха 0 °С (кривая красного цвета) и минус 40 °С с предварительным подогревом и охлаждением с теплоизоляцией (кривая синего цвета) в точке между седловым отводом и трубой

Для получения качественного сварного соединения важную роль играет размер зоны термического влияния, в которой происходят структурные изменения свариваемого материала. Обычно считается, что зона термического влияния при сварке полиэтилена ограничена изотермой 80 °С, при которой начинается фазовый переход с выделением теплоты, характеризующей структурные изменения. Установлено, что максимальный объем зоны термического влияния достигается по истечении 1 минуты после завершения нагрева. На рис. 16 представлены зоны термического влияния приварки седлового отвода к трубе при допустимой температуре воздуха 0 °С (стандартная сварка) и температуре ниже нормативного -40 °С (сварка по предлагаемому режиму).

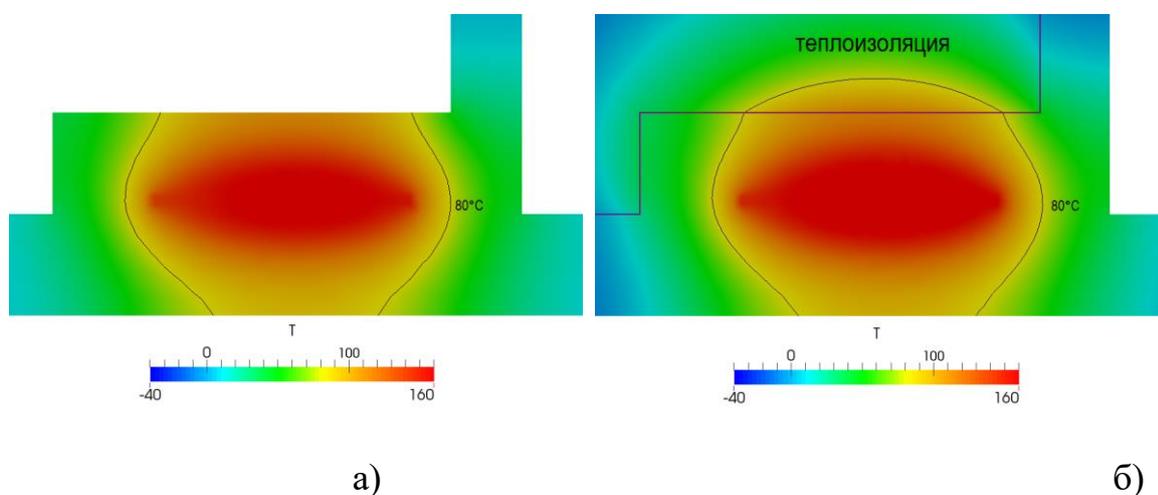
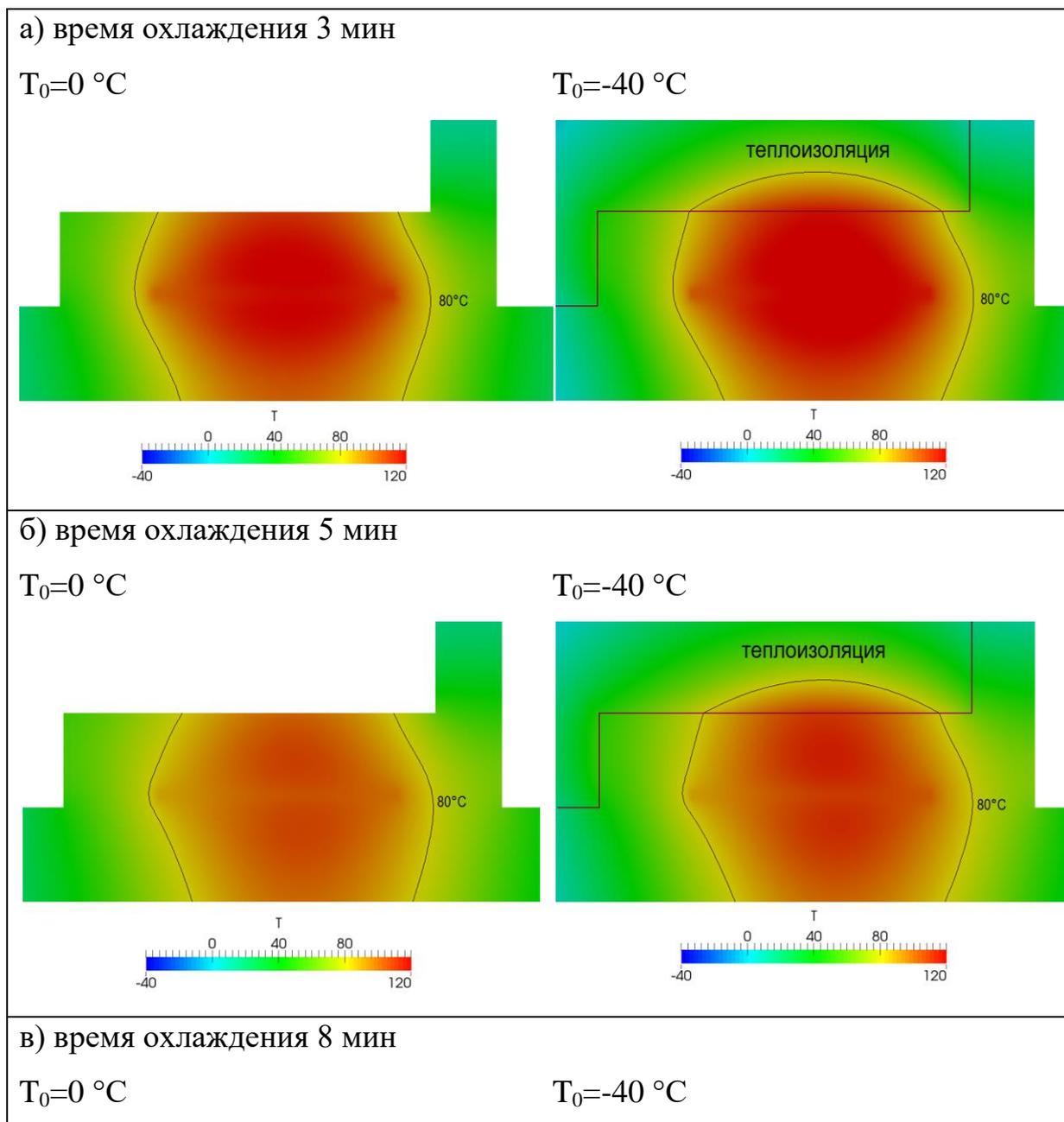


Рис. 16. Зоны термического влияния в сечении седлового отвода и трубы вертикальной плоскостью по истечении 1 минуты после нагрева при температуре ОВ: а - 0 °С (стандартная сварка); б - 40 °С с предварительным подогревом и теплоизоляцией

При охлаждении соединения под слоем теплоизоляции с расчетной толщиной динамика температурного поля близка к допустимой. На рис. 17. показано

распределение температуры при охлаждении в различные моменты времени при температуре воздуха  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (подогрев и охлаждение под теплоизоляцией) и при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (стандартная сварка). Распределения температур в зоне термического влияния при низкой и допустимой температурах близки после одинакового времени охлаждения, что свидетельствует об идентичности процесса кристаллизации, приводящей к равнозначной прочности соединения. На девятой минуте охлаждения в обоих случаях процесс кристаллизации завершается.



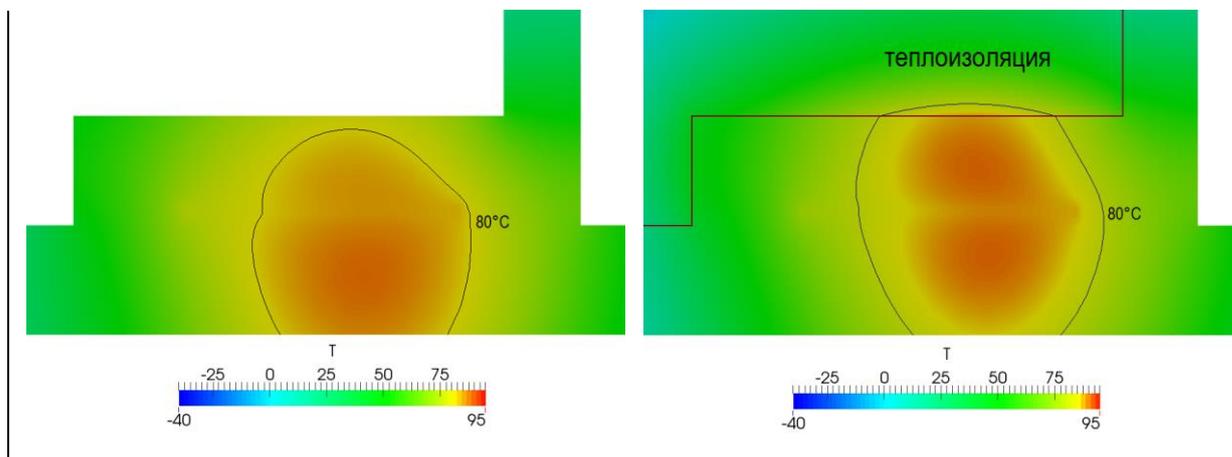


Рис.17. Распределения температур в сечении седлового отвода и трубы во время охлаждения при температурах ОВ 0 °С и минус 40 °С

**Научная новизна.** Впервые разработана методика определения технологических параметров приварки седловых отводов с закладным нагревателем к полиэтиленовым трубам газопровода при низких температурах окружающего воздуха без использования отапливаемых сооружений.

**Практическая значимость.** Разработанная методика может быть использована для проведения приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе газопровода в зимних условиях регионов холодного климата и позволит разработать технологию круглогодичного монтажа ответвлений от магистральных и распределительных газопроводов к промышленным и бытовым потребителям без строительства отапливаемых укрытий.

**Этап 5.** Разработать и апробировать методику оценки остаточного ресурса (долговечности) полиэтиленового газопровода. Получить экспериментальную информацию по климатической и эксплуатационной стойкости полимерных композитных материалов, применяемых в элементах конструкций опор ЛЭП в условиях арктического и холодного климата.

Разработана методика прогнозирования долговечности полиэтиленового газопровода, учитывающая время исчерпания деформационной способности материала газопровода. Установлено, что в течение десятилетней экспозиции в натуральных условиях региона холодного климата в составе действующего газопровода трещиностойкость материала трубы снизилась на 10%.

Испытаниями стеклопластиков на полиэфирной основе, экспонированных

в течение 2-4 года в условиях холодного климата с имитацией эксплуатационных нагрузок и в свободном состоянии, установлена практическая неизменность деформационно-прочностных показателей.

На рисунках 18 и 19 – приведены экспериментальные данные и аппроксимирующие прямые изменения деформационно-прочностных показателей полиэтиленов в процессе теплового старения. Аппроксимация проводилась по экспоненциальному закону в виде:

$$\varepsilon = 1/B \ln (A/(\tau+\tau^*)) \quad (1)$$

где: Таблица 3

	A	B	$\tau^*$
ПЭВП	18,0	-0,84	1,06
ПЭНП	22,2	-1,19	0,83

Результаты прогноза (рис.19) дают срок изменения относительной деформации при разрушении от исходного значения до значения равного деформации при пределе текучести материалов в пределах 15 ÷ 20 лет [1].

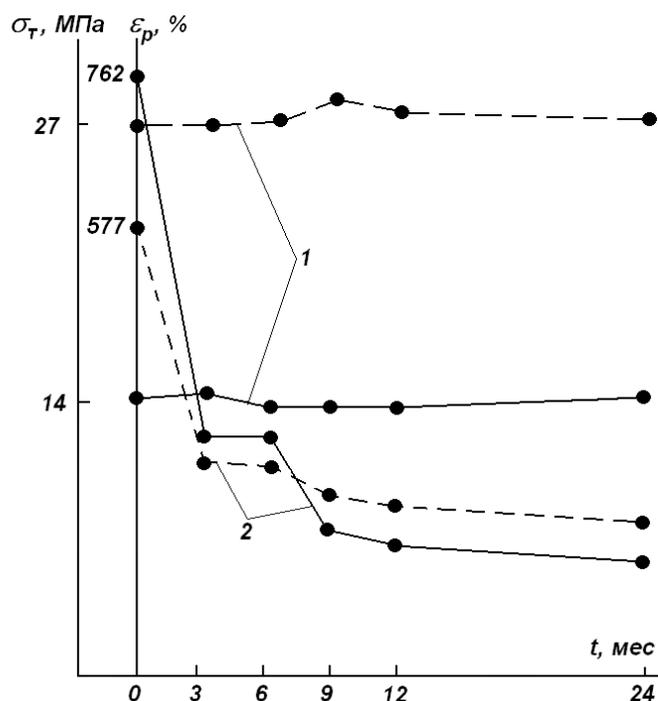


Рис.18. Зависимость  $\sigma_T$  (1) и  $\varepsilon_p$  (2) ПЭНП (-) и ПЭВП (---) от времени теплового старения.

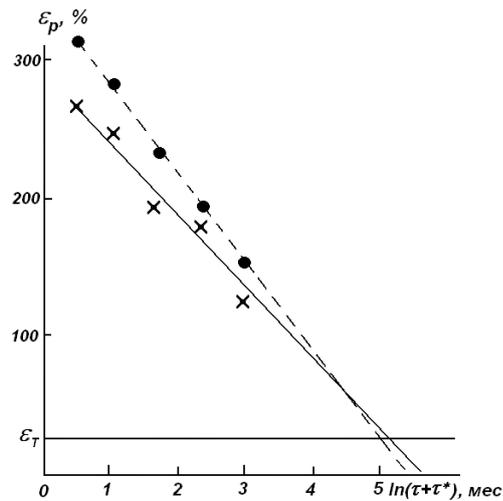


Рис.19. Определение предельного срока службы полиэтиленов: ПЭНП (-) и ПЭВП (---).

Приведенные примеры позволяют полагать, что в процессе эксплуатации материал трубопровода «исчерпывает» свои деформационно-прочностные характеристики по следующей схеме, см. рис.20.

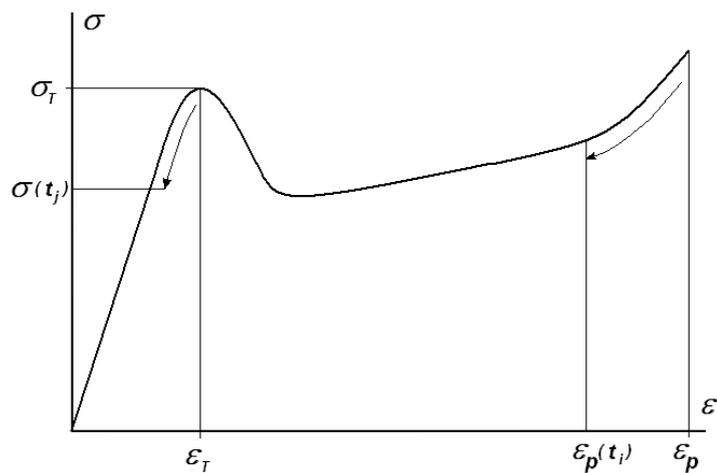


Рис.20. Схема кинетики изменения диаграммы деформирования ( $\sigma - \varepsilon$ ) образцов свидетелей, вырезанных из полиэтиленового трубопровода в процессе мониторинга.

В течении некоторого времени  $\tau_1$  происходит уменьшение величины  $\varepsilon_p$  от начального значения до значения  $\varepsilon_p = \varepsilon_T$ , при практически неизменном значении  $\sigma_T$  (как, например, на рис.18, при  $\tau_1 = 15 \div 20$  лет). Только затем начинается происходить снижение несущей способности трубопровода, т.е.  $\sigma(t) < \sigma_T$ , которую можно описать методикой предложенной в [2].

Таким образом, разработанная методика оценки и прогнозирования долговечности (остаточного ресурса) газопровода предполагает две последовательные процедуры:

1. Определение  $\tau_1$  - времени потери деформационной способности материала газопровода,  $\varepsilon_p \rightarrow \varepsilon_T$ ;
2. Определение  $\tau_2$  - времени потери несущей способности газопровода (исчерпания прочности материала),

$$\sigma_T = \sigma(\tau_1) \rightarrow \sigma(t) \rightarrow MRS$$

3. Прогнозируемый срок эксплуатации газопровода (остаточный ресурс), определяется как:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2,$$

при этом аппроксимирующая зависимость изменения  $\varepsilon_p(t)$  выбирается в форме уравнения (1), а численные значения постоянных коэффициентов уравнения устанавливаются по экспериментальным данным испытаний образцов-свидетелей.

Результаты испытаний образцов-свидетелей газопровода из ПЭ100 SDR9 (таблица4) после двухгодичного нахождения в условиях эксплуатации, не дали возможности произвести апробирование разработанной модели из-за малого срока экспозиции.

Таблица 4

Результаты испытаний на кратковременную прочность при растяжении исходных и образцов-свидетелей полиэтиленового газопровода из ПЭ100 SDR9.

Темпе- ратура испыта- ний	Значения показателей свойств исходных образцов			Значения показателей свойств образцов-свидетелей		
	$\sigma_T$ исх, МПа	$\epsilon_T$ исх, %	$\epsilon_p$ исх, %	$\sigma_T$ свид, МПа	$\epsilon_T$ свид, %	$\epsilon_p$ свид, %
+2 3° С	23,05±	7,9	466	22,78±	8,1	468±
	0,27	±0, 6	±54	0,15	±0, 2	102
- 60° С	48,99±	5,4	-	49,14±	5,4	32,3
	2,23	±0, 3		0,3	±1, 0	±4,1

Результаты испытаний образцов-свидетелей ПЭ80 на определение предела трещиностойкость, входящих в состав армированного полиэтиленового газопровода, показали снижение на 10% (таблица 5).

Таблица 5.

Трещиностойкость ПЭ80 контрольных образцов и образцов-свидетелей

Значения показателей свойств контрольных образцов		Значения показателей свойств образцов свидетелей	
$I_c$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$2r$ , мм	$I_c$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$2r$ , мм
4,06 ± 0,14	3,54 ± 0,61	3,65 ± 0,25	2,76 ± 1,04

Где  $I_c$  - предел трещиностойкости,  $2r$  – размер зоны пластичности в вершине трещины.

Результаты изменения деформационно-прочностных показателей при изгибе намоточного стеклопластика продольно-поперечного армирования на эпоксидной основе при экспонировании в натуральных условиях холодного климата по-

казали, что в течении экспозиции наблюдается повышение прочности при разрушении и снижение деформативности (рис.21 и 22), что объясняется протеканием процессов структурной релаксации и снятием внутренних напряжений. Исследования показали существенный рост прочности и деформативности при разрушении (10÷20%) при понижении температуры испытаний до минус 60°С.

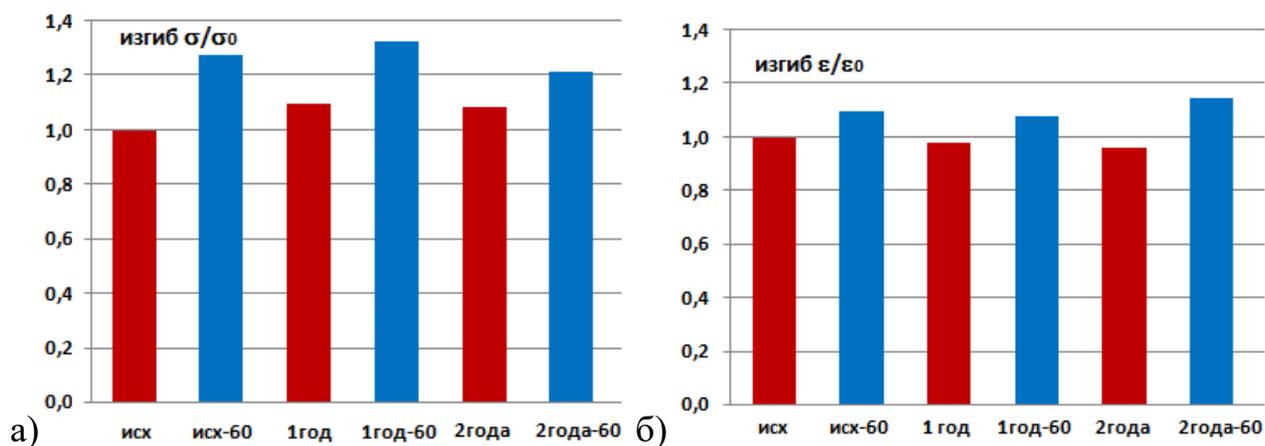


Рис.21. Изменение прочности  $\sigma$  (а) и деформации разрушении  $\varepsilon$  (б) при трехточечном изгибе намоточного стеклопластика от времени экспозиции в натуральных условиях, при температуре испытаний: ■ 21°С; ■ -60°С.

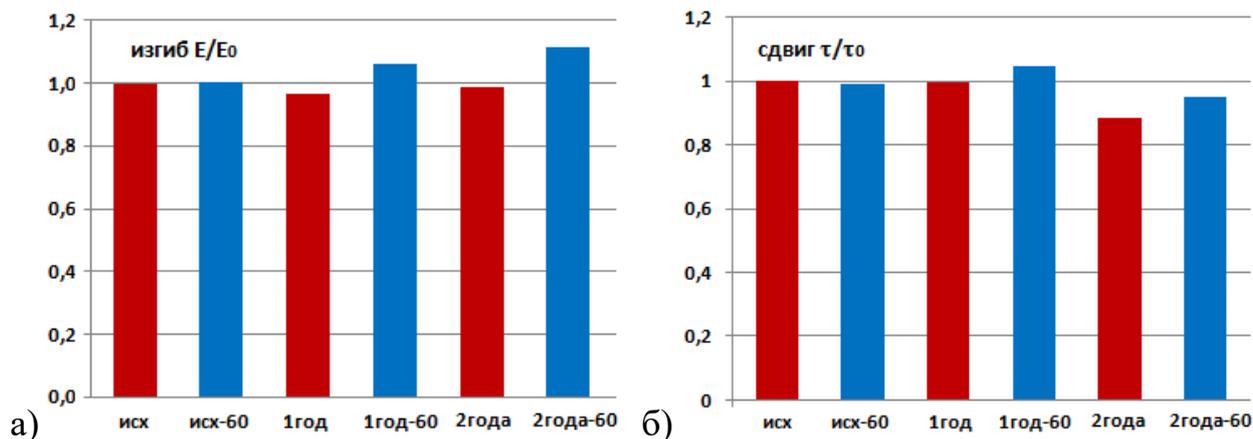


Рис.22. Изменение модуля упругости при трехточечном изгибе (а) и предела прочности при межслойном сдвиге короткой балки намоточного стеклопластика, от времени экспозиции в натуральных условиях, при температуре испытаний: ■ 21°С; ■ -60°С.

Также были проведены исследования изменения деформационно-прочностных показателей при изгибе стеклопластика изготовленного методом пултрузии на полиэфирной основе при экспонировании в свободном и механически нагруженном в условиях постоянной деформации, соответствующей 20% ( $0,2\sigma$ ) разрушающей нагрузки, в натуральных условиях холодного климата. Результаты испытаний образцов показали стабильность деформационно-прочностных показателей (рис. 23-26).

Температурная зависимость сдвиговой прочности зависит от технологии изготовления образцов стеклопластика. Зависимость прочности при сдвиге образцов, изготовленных по технологии намотки, от температуры испытаний не существенна (рис.19), но наблюдается повышение зависимости со временем экспозиции. Зависимость прочности при сдвиге образцов, изготовленных по технологии пултрузии, более существенна ( $\sim 18\%$ ) от снижения температуры испытаний (рис.22), но со временем экспозиции эта зависимость снижается.

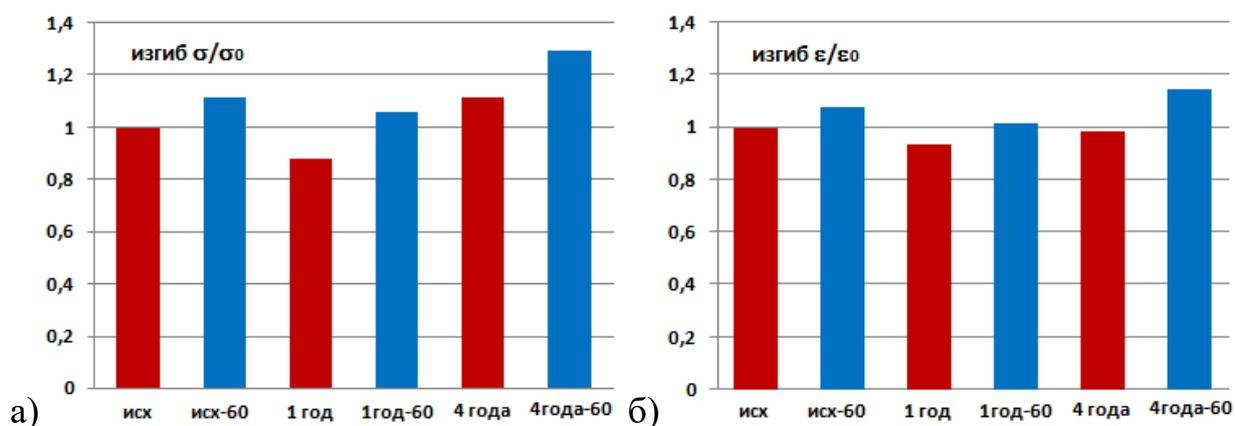


Рис.23. Изменение прочности  $\sigma$  (а) и деформации разрушения  $\epsilon$  (б) при трехточечном изгибе пултрузионного стеклопластика от времени экспозиции в натуральных условиях, при температуре испытаний: ■ 21°C; ■ -60°C.

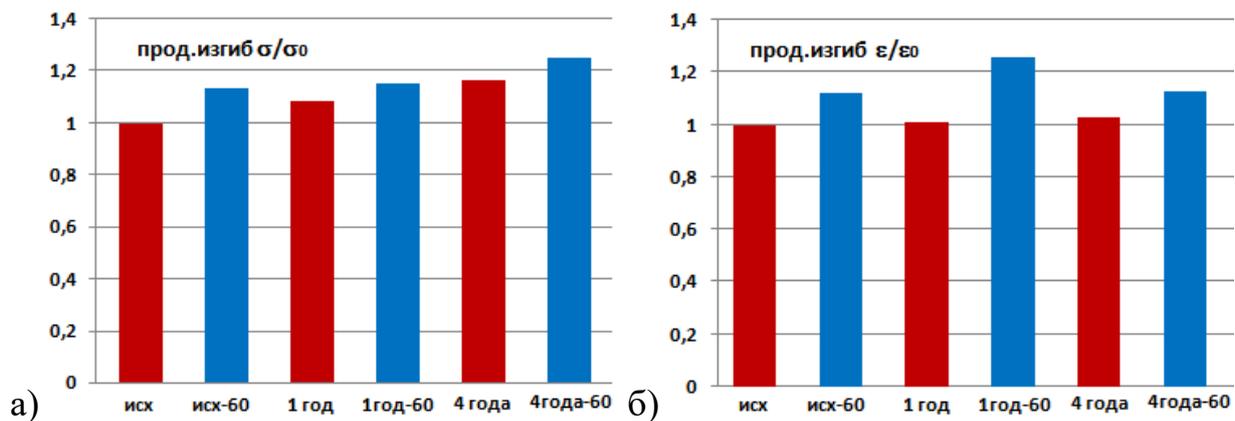


Рис.24. Изменение прочности  $\sigma$  (а) и деформации разрушения  $\varepsilon$  (б) при продольном изгибе пултрузионного стеклопластика от времени экспозиции в натуральных условиях, при температуре испытаний: ■ 21°C; ■ -60°C.

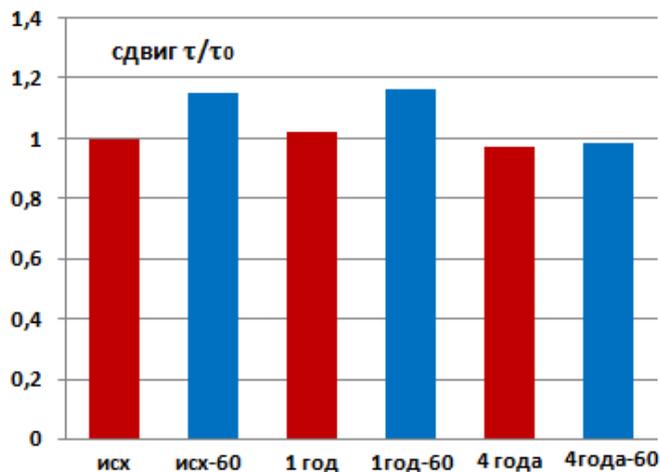


Рис.25. Изменение прочности сдвига  $\tau$  пултрузионного стеклопластика от времени экспозиции в натуральных условиях, при температуре испытаний: ■ 21°C; ■ -60°C.

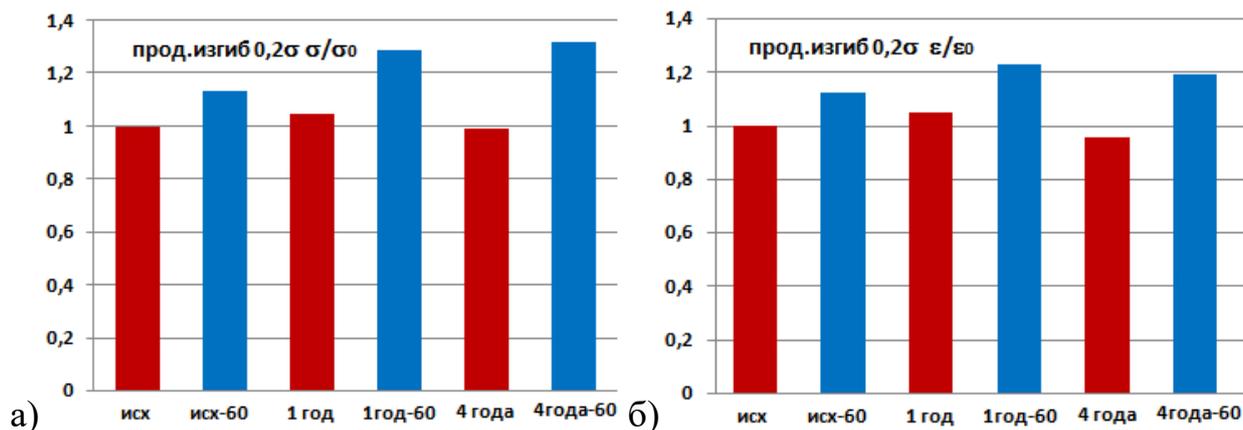


Рис. 26. Изменение прочности  $\sigma$  (а) и деформации разрушения  $\varepsilon$  (б) при продольном изгибе пултрузионного стеклопластика, механически нагруженных условиях продольного изгиба при постоянной деформации, от времени экспозиции в натуральных, при температуре испытаний: ■ 21°C; ■ -60°C.

**Научная новизна.** Разработана методика оценки остаточного ресурса полиэтиленового газопровода, учитывающей время потери деформационной способности материала полиэтиленового газопровода. Установлено, что в течение десятилетней экспозиции в натуральных условиях региона холодного климата в составе действующего газопровода из ПЭ80 трещиностойкость материала трубы снизилась на 10%. Для стеклопластиков на полиэфирной основе впервые получены экспериментальные данные по изменению деформационно-прочностных показателей, показавшие их неизменность при эксплуатации в условиях холодного климата в течение 4-х лет.

**Практическая значимость.** Разработанная методика может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса полиэтиленовых трубопроводов. Полученные результаты могут быть использованы для дополнения базы данных изменения свойств композиционных материалов, эксплуатируемых в условиях холодного климата

На основе принципа множественности моделей разработаны модели прогнозирования остаточного ресурса в уточненных постановках, включающих зависимости, связывающие заданную точность решения задачи прогнозирования с уровнем погрешностей измерения остаточного ресурса, позволяющих с различной степенью детальности исследовать закономерности исследуемых задач прогнозирования. Проведено обобщение существующих подходов к решению сформулированных усложненных вариационных постановок задач прогнозирования остаточного ресурса полимерных композитов, на основе перехода к параллельным процедурам принятия решений.

При разработке различных конструкций, машин и механизмов одной из важных проблем является проблема создания надежных методов количествен-

ной оценки работоспособности конструкций из полимерных и композиционных материалов [1-4]. Для построения моделей и разработки методов прогнозирования необходимы экспериментальные данные об изменении остаточного ресурса полимерных композитов (ПК) в годы предшествующие периоду прогнозирования. С этой целью в ИПНГ СО РАН проводятся краткосрочные эксперименты для экспериментального измерения изменения остаточного ресурса с течением времени в период, предшествующий прогнозу, при воздействии экстремальных климатических факторов. На рис. 27 представлены образцы из стеклопластика на полиэфирной основе, изготовленные по технологии пултрузии.



Рис.27. Образцы из стеклопластика на полиэфирной основе, изготовленные по технологии пултрузии



Рис. 28. Образцы из стеклопластика на эпоксидной основе, изготовленные по технологии намотки



Рис.29. Образцы полиэтиленовых труб, изготовленные по технологии экструзии

В качестве остаточного ресурса выбраны деформационно-прочностные свойства материала при растяжении, трехточечном изгибе, продольном изгибе и сдвиге.

Для существенного повышения достоверности прогноза остаточного ресурса ПК на основе принципа множественности моделей разработаны модели прогнозирования остаточного ресурса в уточненных постановках, включающих зависимости, связывающие заданную точность решения задачи прогнозирования  $\gamma_{\max}$  с уровнем погрешностей измерения остаточного ресурса  $\varepsilon_{\max}$ , позволяющих с различной степенью детальности исследовать закономерности исследуемых задач прогнозирования, определяемые влиянием особенностей микро-, и макроструктуры ПК на характер и структуру временной зависимости их остаточного ресурса. В соответствии с введенным принципом множественности моделей прогнозирования остаточного ресурса разработана методика построения модели прогнозирования оптимальной структуры.

Требуемые функциональные зависимости, связывающие заданную точность решения задачи прогнозирования  $\gamma_{\max}$  с уровнем погрешностей измерения остаточного ресурса на временном интервале, предшествующем временному интервалу прогнозирования, могут быть в общем случае представлены в форме:

$$\gamma_{\max} = F\left(\varepsilon_{\max}, \max_{T_{\min} \leq t \leq T_{\max}} \max_{u \in U} \|R(u;t)\|; \max_{T_{\min} \leq t \leq T_{\max}} \max_{u \in U} \|\nabla R(u;t)\|; \max_{T_{\min} \leq t \leq T_{\max}} \max_{u \in U} \|\nabla^2 R(u;t)\|\right).$$

В этих обозначениях:  $\gamma_{\max}$  - минимально допустимая заданная точность прогнозирования ;  $T_{\min}$  ,  $T_{\max}$  – нижняя и верхняя границы временного интервала на

котором решается задача прогнозирования;  $U$  - множество допустимых значений параметра модели прогнозирования, определяемое физическими особенностями конкретной задачи прогнозирования остаточного ресурса;  $\nabla R(u;t)$  - градиент от моделируемой зависимости остаточного ресурса;  $\nabla^2 R(u;t)$  - матрица вторых частных производных моделируемой зависимости остаточного ресурса.

Выявление и включение такого рода функциональных соотношений, связывающих заданную точность прогноза  $\gamma_{\max}$  с параметрами модели прогнозирования, характеризующих особенности микро- и макроструктуры ПК, в вариационную постановку задачи прогнозирования может позволить существенно повысить точность и достоверность решения задачи прогнозирования остаточного ресурса.

Проведено обобщение существующих подходов к решению сформулированных усложненных вариационных постановок задач прогнозирования остаточного ресурса ПК, уточняющих и обобщающих существующие упрощенные подходы, на основе перехода к параллельным процедурам принятия решений, при которых для построения наиболее эффективного решения на каждой  $p$ -ой итерации комбинированного подхода используется система приближений  $u^{p,1}$ ,  $u^{p,2}$ , ...,  $u^{p,k}$  ( $p=0,1,2,\dots$ ), полученных на данной итерации каждым из составляющих комбинированного подхода методов  $M_1, M_2, \dots, M_k$  (рис. 30).

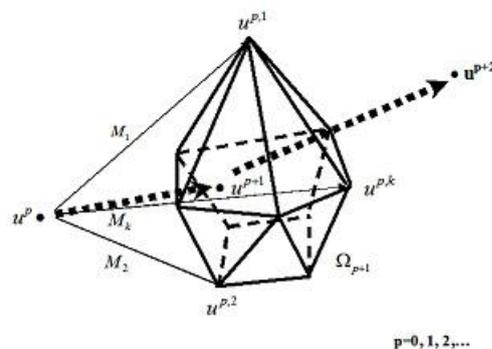


Рис. 30. Схема комбинированного метода поиска экстремума, основанного на параллельном применении составляющих его методов  $M_1, M_2, \dots, M_k$

**Научная новизна.** На основе принципа множественности моделей разработаны модели прогнозирования остаточного ресурса в уточненных постановках, включающих зависимости, связывающие заданную точность решения задачи прогнозирования с уровнем погрешностей измерения остаточного ресурса, позволяющие с различной степенью детальности исследовать закономерности исследуемых задач прогнозирования.

**Практическая значимость, области применения.** Разработанные на основе принципа множественности моделей, модели прогнозирования, позволяют повысить достоверность решения практических задач прогнозирования остаточного ресурса и уменьшить размеры доверительных интервалов, содержащих прогнозируемые решения.