

25. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53. № 5-6. Pp. 923–930.
26. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Distinctive features of the gas-phase ignition of a mixture of a kerosene vapor and air by a steel wire heated to high temperatures // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2009. V. 82. № 6. Pp. 1059–1065.
27. Glushkov D.O., Strizhak P.A. Heat and Mass Transfer at Ignition of Solid Condensed Substance with Relatively Low Calorific Power by a Local Energy Source // Journal of Engineering Thermophysics. 2012. V. 21. № 1. Pp. 69–77.
28. Бирюлин Г. В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. – 89 с.
29. Garcia A.L. Numerical methods for physics. New York: Prentice Hall, 2000. – 423 p.
30. Reddy J. N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. New York: Oxford University Press, 2004. – 480 p.
31. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. – 42 с.
32. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
33. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. – 46 с.
34. Гува А. Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
35. Иванов В. В., Шкребко С. В. Моделирование тепловых процессов подземных бесканальных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену. Т. 7. Теплопроводность, теплоизоляция. М.: МЭИ, 1998. С. 106–108.
36. Иванов В. В., Василенко В. В., Черныш С. В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс // Известия ВУЗов. Строительство. 2000. № 1. С. 66–69.

УДК 621.643.001:536.2

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ БЕСКАНАЛЬНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Половников В.Ю., Губанов Ю.Ю.
Томский политехнический университет

Тепловые режимы теплопроводов, равно как и масштабы тепловых потерь в тепловых сетях, оказывают существенное влияние на экономичность и эффективность работы систем теплоснабжения. При этом основное влияние на уровень сверхнормативных тепловых потерь оказывают состояние тепловой изоляции [1] и условия эксплуатации теплопроводов [2, 3]. Следует отметить, что в настоящее время уровень тепловых потерь в сетях теплоснабжения РФ составляет [4] от 10 до 30 % и более, в то время как в мире он не превышает 6-8 % [5].

Действующие нормы и правила проектирования тепловой изоляции [6, 7], а следовательно, и методы анализа тепловых режимов теплопроводов основаны на упрощенных аналитических соотношениях и не учитывают множества реальных факторов и процессов, приводящих к интенсификацию процессов теплопереноса в элементах конструкций и зонах размещения теплопроводов. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых подходов к проектированию и анализу эксплуатационных режимов систем транспортировки тепловой энергии, учитывающих полный комплекс физических процессов, протекающих в рассматриваемых системах.

Целью данной работы является демонстрация возможностей современных подходов к исследованию тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла на примере работы типичной бесканальной тепловой сети в условиях реальной эксплуатации.

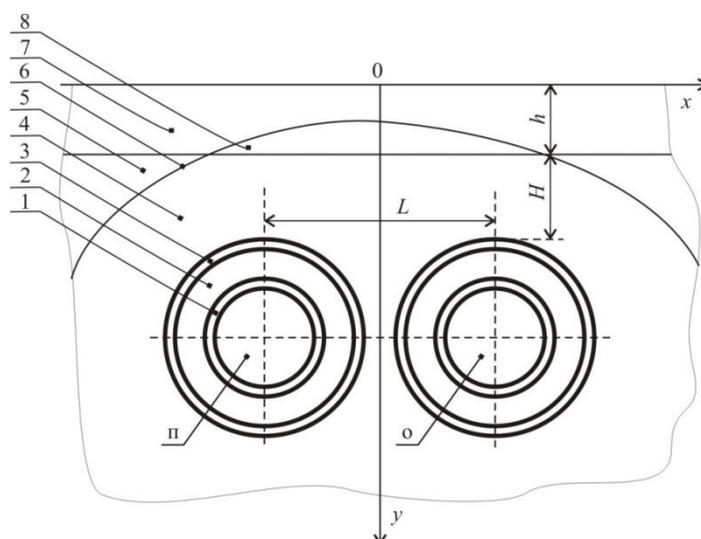


Рисунок 1. Схема области решения: 1 –металлическая стенка трубы; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – слой гидроизоляции; 4 – грунт талый; 5 – грунт мерзлый; 6 – граница раздела между талой и мерзлой зонами; 7 – снег уплотненный; 8 – снег талый; п, о – подающий и обратный теплопроводы; H – расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции; L – расстояние между осями теплопроводов; h – толщина снежного покрова.

Рассматривается типичный теплопровод бесканальной прокладки – трубопроводы изолированные пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена [8] (рис. 1). Предполагается, что теплопровод эксплуатируется в условиях промерзания грунта и наличия снежного покрова в зоне над прокладкой. Для рассматриваемой области (рис. 1) решается двумерная стационарная задача теплопроводности в системе «бесканальный теплопровод – окружающая

среда». Решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой системы (рис. 1) не является целесообразным, поскольку нестационарные режимы работы теплопроводов наблюдаются только при вводе тепловых сетей в эксплуатацию после плановых или внеплановых остановок и не являются характерными режимами их работы [9].

В настоящее время имеется ряд работ [10–14], посвященных исследованию тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных теплопроводов. В [10–14] приведены результаты анализа влияния различных эксплуатационных факторов на тепловые потери бесканальных теплопроводов, а также описаны проблемы, связанные с проектированием и эксплуатацией предизолированных бесканальных трубопроводов тепловых сетей. При этом в [10–13] не учитывается возможное промерзание грунта в зоне прокладки и изменение его теплофизических характеристик, хотя из [15] известно, что в большинстве регионов России наблюдается сезонное промерзание грунтов с существенными глубинами нулевой изотермы. Только в [14] приведены результаты численного исследования тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных теплопроводов с учетом промерзания грунта в зоне прокладки. Данная работа является продолжением исследований [14], в которой учитывается наличие дополнительного термического сопротивления в виде слоя снега над прокладкой (рисунок 1).

Математическая модель для рассматриваемой задачи аналогична моделям, приведенным в [9, 14]. Решение задачи получено с применением средств и функций пакета программ мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения. Координаты границы раздела между талой и мерзлой зонами (рис. 1) определялись по координатам изотермической линии 273 К в результате серии численных экспериментов методом последовательных приближений.

При проведении численного моделирования использовалась расчетная область с размерами 6 м в глубину и по 5 м в стороны от оси симметрии. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области решения не превышало 0,5 %.

Исследования проводились для трубопроводов с диаметрами условного прохода трубопроводов 600 мм, изготовленных из стали 10 (толщина стенки 8 мм), тепловая изоляция – пенополиуретан (толщина 40 мм) [8], покровный слой – полиэтилен (2 мм) [8]. Расстояния от по-

верхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции принималось равным $H = 2$ м, а между осями трубопроводов составляло $L = 1,3$ м (рис. 1). Температуры теплоносителей в подающем и обратном трубопроводах принимались равными 338 К и 323 К в соответствии со среднегодовым температурам теплоносителей в водяных тепловых сетях при их работе по температурному графику 95/70 С [6]. Толщина снежного покрова принималась равной количеству осадков, выпавших за холодный период года для города Томск [15] $h = 185$ мм (рисунок 1). Температура окружающей среды принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [15] – 264,2 К. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «уплотненный снег – окружающая среда» варьировался в пределах от 5 до 30 Вт/(м²·К).

В таблице 1 приведены значения [16] теплопроводности, теплоемкости и плотности грунтов, снега, стенки трубы, тепловой и гидроизоляции, использовавшиеся при проведении численных исследований (рис. 1).

Таблица 1. Теплофизические характеристики

Характеристика	Покровный слой	Тепловая изоляция	Стенка трубы	Грунт				Снег	
				Глинистый		Песчаный		Уплотненный	Начавший таять
				Талый	Мерзлый	Талый	Мерзлый		
Теплопроводность, Вт/(м·К)	,33	,033	0,2	,1	,3	,3	,7	,35	,64
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	200	470	62	231	59	486	005	100	100
Плотность, кг/м ³	20	0	700	700	700	000	000	50	00

Основные результаты численного исследования тепловых режимов бесканальных теплопроводов в условиях промерзания грунта и наличия снежного покрова в зоне прокладки приведены в таблице 2 и на рис. 2.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета. Относительная погрешность расчетов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,2 %, что является приемлемым при оценке тепловых потерь бесканальных теплотрасс.

Сопоставление результатов математического моделирования с известными данными других авторов по исследованию теплопереноса в зонах размещения подземных теплопроводов [12, 13] позволяет говорить о хорошем качественном согласовании результатов. При этом следует отметить, что сведений, приведенных в теоретических [12, 13] и экспериментальных, например [1, 10], работах по исследованию тепловых потерь подземных теплопроводов недостаточно для детализированного количественного сопоставления результатов моделирования с данными [1, 10, 12, 13].

Таблица 2. Результаты численного моделирования

Грунт	Песчаный				Глинистый			
α , Вт/(м ² ·К)	5	10	20	30	5	10	20	30
$Q_{СП}$, Вт/м	175,32				129,73			
Q_0 , Вт/м	137,40	140,48	142,10	142,65	100,48	102,15	103,01	103,30
Q_1 , Вт/м	124,39	126,79	128,36	128,91	93,07	94,63	95,42	95,69
Q_2 , Вт/м	144,70	149,94	152,27	153,21	102,17	104,30	105,26	105,62
$\delta_0 = \frac{Q_{СП} - Q_0}{Q_{СП}} 100\%$	21,63	19,87	18,95	18,63	22,55	21,26	20,60	20,37
$\delta_1 = \frac{Q_2 - Q_0}{Q_2} 100\%$	5,04	6,30	6,67	6,89	1,65	2,06	2,14	2,19
$\delta_2 = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} 100\%$	14,03	15,44	15,70	15,86	8,91	9,27	9,35	9,40
$\delta_3 = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} 100\%$	9,47	9,74	9,67	9,63	7,37	7,36	7,36	7,36

В таблице 2 приведены тепловые потери рассматриваемой системы (рис. 1) с учетом промерзания грунта и наличия снежного покрова над прокладкой Q_1 , без учета наличия слоя снега Q_2 и без учета осложняющих факторов (промерзание грунта, наличие снежного покрова) Q_0 , а также представлено сопоставление Q_0 , Q_1 и Q_2 между собой и с величиной потерь $Q_{\text{СП}}$, вычисленной в соответствии с методикой [6].

Результаты численного моделирования тепловых потерь бесканальных теплопроводов, приведенные в таблице 2, свидетельствуют об ожидаемом росте тепловых потерь при прокладке теплопроводов в песчаных грунтах, имеющих большие коэффициенты теплопроводности (таблица 1). Также наблюдается закономерное возрастание потерь тепловой энергии с ростом интенсивности теплоотдачи на внешнем контуре рассматриваемой системы (рис. 1).

Анализ изменения величин тепловых потерь в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на границе раздела «уплотненный снег – окружающая среда» (таблица 2) позволяет сделать вывод о том, что увеличение теплоотдачи в 6 раз приводит к росту тепловых потерь до 3,5 %.

Промерзание грунта в зоне прокладки теплопровода сопровождается соответствующим ростом тепловых потерь вследствие изменения теплофизических характеристик грунта при замерзании (таблица 1). Сопоставление тепловых потерь бесканальных теплопроводов с учетом Q_2 и без учета промерзания грунта Q_0 позволяет сделать вывод о том, что при прокладке теплопроводов в песчаных грунтах потери тепла возрастают на $\delta_1=5,04-6,89$ %, а в глинистых – на $\delta_1=1,65-2,19$ % в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на внешнем контуре взаимодействия (таблица 2).

Учет наличия снежного покрова над прокладкой приводит к снижению потерь тепла из-за увеличения эффективного термического сопротивления слоя над прокладкой. Сопоставление значений тепловых потоков Q_2 и Q_1 (таблица 2) позволяет говорить о том, что при наличии снежного покрова потери тепла снижаются на $\delta_2=14,03-15,86$ % и на $\delta_2=8,91-9,40$ % при прокладке теплопроводов в песчаных и глинистых грунтах соответственно.

Общее изменение тепловых потерь δ_3 в рассматриваемой системе (рис. 1), связанное с ростом тепловых потоков δ_1 вследствие промерзания грунта и их снижением δ_2 , обусловленным наличием дополнительного термического сопротивления (слой снега над прокладкой) по сравнению с вариантом расчета, не учитывающим осложняющих факторов, составляет от 7,36 % до 9,74 % (таблица 2). Таким образом, учет ослож-

няющих факторов (наличие дополнительных термических сопротивлений и изменение теплофизических характеристик веществ при наличии талых и мерзлых зон) позволяет заметно уточнить масштабы тепловых потерь бесканальных теплопроводов, эксплуатируемых в подобных условиях.

Также в таблице 2 приведено сопоставление δ_0 результатов численного расчета тепловых потерь рассматриваемой системы (рис. 1) без учета осложняющих факторов Q_0 с величиной тепловых потерь $Q_{СП}$, вычисленной в соответствии с [6] для условий идентичных условиям рассматриваемой задачи. Анализ изменения значений δ_0 свидетельствует о том, что отклонение $Q_{СП}$ от Q_0 составляет около 20 % и обусловлено тем, что в [6] для расчета термического сопротивления грунта используется формула Форхгеймера, которая, как известно [17], дает существенные погрешности в расчетах теплопередачи в системах с большими глубинами заложения трубопроводов.

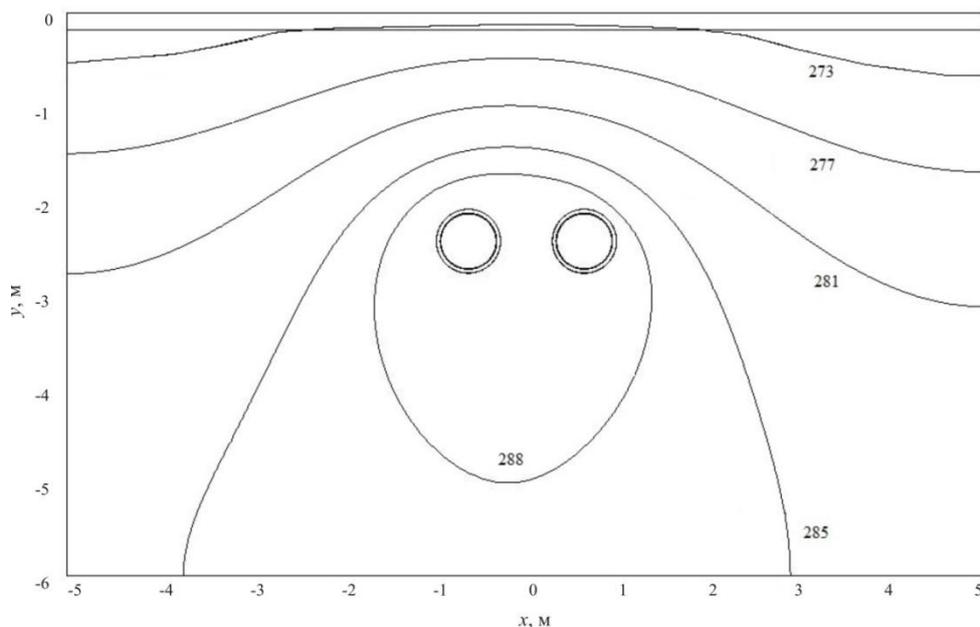


Рис.2. Типичное температурное поле для рассматриваемой области решения.

На рис. 2, в качестве примера, приведено типичное температурное поле в зоне размещения бесканального теплопровода в условиях промерзания грунта и наличия слоя снега при прокладке в песчаном грунте и $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. На рис. 2 изотермическая линия 273 К соответствует границе раздела мерзлых и талых сред.

Распределения температур в рассматриваемой области решения свидетельствуют о том, что изотермические линии (рисунок 2) сгущаются непосредственно над трубопроводами и более разрежены при уда-

лении от них, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности в твердых телах и качественно соответствует [12, 13].

Следует еще раз отметить, что в методике [6, 7] отсутствует возможность учета влияния таких факторов как изменение условий теплообмена на границе взаимодействия с окружающей средой, изменение теплофизических характеристик грунта при промерзании, наличия дополнительных термических сопротивлений, что в совокупности с неизбежной погрешностью расчета тепловых потоков с использованием формулы Форхгеймера дает отклонение между результатами моделирования Q_1 и расчетами по методике [6] $Q_{СП}$ около 40 %. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости разработки новых подходов к анализу тепловых потерь в тепловых сетях. Одним из возможных путей решения этой задачи является использование современных программных комплексов для математического моделирования тепловых режимов рассматриваемых систем. Использование коммерческих (COMSOL, ANSYS) или открытых (OpenFOAM) систем численного моделирования физических процессов представляет практически неограниченные возможности для учета и анализа различных факторов и процессов, влияющих на интенсификацию процессов переноса в рассматриваемых объектах, а большое количество, успешно решенных с помощью подобных систем задач, позволяет с уверенностью говорить о перспективности их использования для прогностического моделирования различных элементов систем теплоснабжения. По этим причинам использование современных программных комплексов для математического моделирования тепловых режимов тепловых сетей в условиях реальной эксплуатации является актуальным и позволит в сжатые сроки разработать прогностические модели и методики теплового расчета, учитывающие полный комплекс физических процессов, протекающих в рассматриваемых системах.

Установлено, что в рамках рассматриваемой задачи промерзание грунта в зоне размещения бесканальных тепловых сетей приводит к росту тепловых потерь до 7 %, а наличие снежного покрова над прокладкой приводит к снижению уровня тепловых потерь на 9–15 %.

Показано, что расчеты тепловых потерь в соответствии с [6] дают отклонение от результатов численного моделирования около 40 %, что свидетельствует о необходимости корректировки правил по проектированию тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей [6, 7].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения современных методов и подходов к анализу тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных тепловых сетей в условиях

реальной эксплуатации и возможности их применения при создании энергосберегающих систем транспортировки тепла.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а и грантов Президента РФ № МК-1284.2011.8, № МК-1652.2013.8.

Список литературы:

1. Кириллов Ю.И., Мотлохов М.А., Бычков А.М., Звонарев М.Г. Состояние тепловой изоляции на электростанциях ОАО РАО «ЕЭС России» // Энергетик. – 2005. – № 11. – С. 2 – 5.
2. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 2. – С. 37 – 39.
3. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Оценка масштабов тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2006. – № 8. – С. 32 – 34.
4. Ватин Н.И., Дубов В.В., Петраков Г.П. Внедрение РМД 41-11-2012 Санкт-Петербург «Устройство тепловых сетей в Санкт-Петербурге» // Интернет-журнал «Строительство уникальных зданий и сооружений». – 2013. – № 1(6). – С. 48–54.
5. Шишкин А. Н. О проекте федерального закона «О теплоснабжении» // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 6. – С. 20–24.
6. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. – 42 с.
7. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. СПб.: Деан, 2004. – 61 с.
8. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А.А. Николаева. – Курган: Интеграл, 2010. – 357 с.
9. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численное моделирование теплопереноса в зонах прокладки теплотрасс // Известия РАН. Энергетика. – 2012. – № 2. – С. 151 – 159.
10. Слепченко В.С., Рондель А.Н., Шаповалов Н.И. Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 6. – С. 18 – 23.
11. Беляков В.А. Опыт и проблемы проектирования бесканальной и канальной прокладки теплопроводов в ППУ-изоляции // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 6. – С. 32–33.
12. Иванов В.В., Вершинин Л.Б. Распределение температур и тепловых потоков в зоне подземных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция

- по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 103–105.
13. Иванов В. В., Шкробко С. В. Моделирование тепловых процессов подземных бесканальных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 106–108.
 14. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Тепловые потери бесканальных теплотрасс в условиях промерзания грунта в зоне прокладки // Известия вузов. Проблемы энергетики. - 2012. - №11-12. С. 64-71.
 15. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2000. –57 с.
 16. Гува А. Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
 17. Агапкин В. М., Кривошеин Б. Л., Юфин В. А. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. М.. Недра, 1981. – 256 с.

УДК 536.2:539.3

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕФЛЕКТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Пономарев В.С.^{1,2}, Герасимов А.В.^{1,2}, д.ф.-м.н.,

Пономарев С.В.², д.ф.-м.н, Шендалев Д.О.³, к.т.н., Попов А.В.³

¹Томский политехнический университет, г. Томск,

²НИИПММ Томского государственного университета, г. Томск,

³ОАО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск

E-mail: vsponomarev@niipmm.tsu.ru

Разработка систем связи для высокочастотных диапазонов приводит к необходимости создания антенн космического назначения с отражающей поверхностью (ОП), имеющей среднеквадратическое отклонение (СКО) порядка 10^{-5} метра. Таким точностям удовлетворяют прецизионные рефлекторы, изготавливаемые из полимерных композиционных материалов. Кроме высокой точности подобные рефлекторы имеют малый вес и соответственно высокие динамические характеристики по сравнению с аналогичными рефлекторами, изготовленными из металлов. Прецизионные рефлекторы имеют размеры, ограниченные размером обтекателя ракета-носителя.

Наряду с жесткими прецизионными рефлекторами на космических аппаратах (КА) используются крупногабаритные разворачиваемые рефлекторные космические антенны. На трансформируемые рефлекторы с увеличенной апертурой также накладываются требования по массе, жесткости и точности ОП (СКО порядка 5^{-3} м).

Точность ОП обоих видов рефлекторов помимо изначально заложенной величины СКО, связанной с неточностями при