

УДК 622.691.4.00467

В. К. ИТБАЕВ, Р. Г. СУЛТАНОВ, В. М. ГОРБАНЕНКО, Ч. А. ЯРУЛЛИН**ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ПОВРЕЖДЕННЫХ, ТРУДНОДОСТУПНЫХ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ
С ПОМОЩЬЮ АВИАЦИОННЫХ ГИБКИХ МЕТАЛЛУРУКАВОВ**

Предлагается новый метод ремонта труднодоступных, протяженных участков газопроводов с помощью авиационных гибких металлических рукавов. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающих возможность внедрения данного метода. Газопровод; методы ремонта; гибкие металлические рукава; расчет оплетки; усилие протягивания

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы экстренного восстановления распределительных газопроводов являются актуальными, так как при повреждении газопроводов создаются экстремальные ситуации, к которым относятся опасность взрыва, остановка непрерывных производств, а также замораживание отопительных систем жилых и производственных помещений в зимнее время. Наибольшие трудности возникают при необходимости ремонта труднодоступных участков газопроводов, к которым относятся участки, пролегающие по руслам рек, под полотном железнодорожных путей и автомагистралей, а также участки, близко расположенные к тепловым сетям, силовым электрическим кабелям и другим коммуникациям или пересекающиеся с ними.

Анализ публикаций и патентный поиск способов ремонта поврежденных магистральных и распределительных трубопроводов позволили все существующие способы укрупненно разделить на следующие 4 группы:

- методы ремонта, связанные с заменой дефектного участка трубопровода новым;
- методы ремонта, которые предусматривают герметизацию поврежденного участка трубы снаружи;
- методы ремонта, в которых герметизация осуществляется изнутри трубопровода;
- методы ремонта по так называемому типу «труба в трубе», в которых в поврежденный участок трубопровода вставляется новая труба меньшего диаметра.

Первые две группы неприемлемы для ремонта труднодоступных участков газопроводов, так как требуют их вскрытия. Третья

группа способов ремонта, ввиду необходимости специального оборудования и устройств, а также из-за сложности обеспечения полной герметизации изнутри трубопровода без визуального контроля, отличается большой трудоемкостью и малой надежностью. Кроме того, из-за необходимости ввода в трубопровод устройств для герметизации эти способы ремонта применимы лишь по отношению к трубопроводам большого диаметра.

Известные способы ремонта, относящиеся к четвертой группе, обеспечивающие сохранение существующего трубопровода на своем месте под землей или на дне водоемов, достаточно сложны и имеют некоторые ограничения, снижающие возможности их применения. Для обеспечения протягивания прямолинейной металлической трубы меньшего диаметра ремонтируемый участок должен быть прямым или иметь незначительную кривизну. Кроме того, для ввода новой трубы необходимо освободить от грунта и др. соосный с ремонтируемым участок значительной длины, что не всегда возможно.

Использование эластичных и пластмассовых труб снижает эффективность и надежность ремонта вследствие их малой прочности, и этот недостаток может проявляться в случаях:

- истирания ремонтной трубы при протягивании о внутреннюю поверхность дефектного участка трубопровода, покрытую коррозией и имеющую заусенцы. По этой причине применение пластмассовых труб для ремонта протяженных и изогнутых участков трубопроводов из-за увеличения сил взаимодействия при протягивании вообще становится проблематичным;

– разрушения или потери герметичности при подаче рабочего давления из-за взаимодействия с дефектами поврежденного трубопровода типа заусенцев, трещин, коррозии. При наличии трещин или участков сквозной коррозии большого размера не исключено выдавливание эластичной трубы в эти дефектные области и ее разрушение;

– разрушения или уменьшения проходного сечения эластичных и пластмассовых труб при осыпании продуктов коррозии или грунта, попадающего в трубопровод через сквозные повреждения;

– пластмассовые трубы, предназначенные для транспортировки среды под давлением, должны иметь большую толщину, что, во-первых, уменьшает гибкость трубы и затрудняет протягивание в искривленные участки поврежденного газопровода, во-вторых, перекрывает в значительной степени проходное сечение.

Необходимость в наличии специального оборудования для закачивания между внутренней поверхностью ремонтируемого трубопровода и наружной поверхностью пластмассовой трубы какого-либо уплотнителя либо твердеющей композиции для повышения несущей способности восстанавливаемого участка также вызывает значительные трудности и усложняет способы ремонта.

1. СПОСОБ РЕМОНТА ГАЗОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ГИБКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУКАВОВ

Для быстрого и надежного восстановления поврежденных труднодоступных (в том числе протяженных и искривленных) участков газопроводов авторами предложен метод ремонта, предусматривающий применение авиационных гибких металлических рукавов (ГМР) производства ГУУАП «Гидравлика». Гибкость этих рукавов позволяет быстро и без дополнительного оборудования протягивать их в поврежденный участок газопровода, сматывая их, например, с бобины. При этом размеры приямков, отрываемых по краям поврежденного участка, невелики, так как определяются исходя из допускаемого техническими условиями радиуса изгиба рукава (как правило, его величина не менее $5d$, где d — диаметр ГМР). Малыми значениями допускаемого радиуса изгиба ГМР обуславливается и возможность их протягивания в поврежденные участки газопроводов, имеющие достаточно большие искривления продольной оси. Проволочная оплетка ГМР

надежно защищает гофрированную оболочку от повреждений при протягивании, а большая радиальная прочность самой оболочки достаточна для того, чтобы ее проходное сечение при этом не изменялось. ГМР в соответствии с техническими условиями рассчитываются на большие давления транспортируемой среды (до 5–10 МПа), имея при этом трехкратный запас прочности, поэтому ремонтный рукав без какого-либо дополнительного подкрепления (заполнения межтрубного пространства затвердевающими композициями) с большим запасом будет воспринимать давление газа при эксплуатации. В случае больших длин ремонтируемых участков газопроводов возможно использование нескольких стандартных плетей выпускаемых ГМР, которые соединяются сваркой и суммарная длина которых равна длине ремонтируемого участка.

Детальная проработка вопроса о возможности нового применения авиационных ГМР потребовала решения двух задач:

- 1) определения прочности ГМР при действии осевой растягивающей силы. Постановка и решение задачи являются новыми потому, что, несмотря на значительный период применения ГМР в авиационной и ракетной технике, такие расчеты не проводились;
- 2) определения усилия, необходимого для протягивания ГМР в поврежденный газопровод с известной геометрией.

2. РАСЧЕТ ОСЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ГМР

Известно, что гофрированные оболочки ГМР имеют достаточно большую жесткость в радиальном направлении, а их осевая жесткость невелика, поэтому практически вся осевая нагрузка на ГМР воспринимается проволочной оплеткой. Таким образом, определение осевой прочности ГМР сводится к расчету его оплетки при нагружении осевой силой.

Расчетная схема представлена на рис. 1. Рассматривается полувиток AB проволочного элемента оплетки. Его продольная ось считается правильной винтовой линией, навитой на жесткий в радиальном направлении цилиндр с диаметром, равным наружному диаметру гофрированной оболочки.

Длина этого полувитка равна

$$L = \frac{\pi D_n}{2 \cos \beta}, \quad (1)$$

где D_n — наружный диаметр гофрированной оболочки; β — угол оплетения.

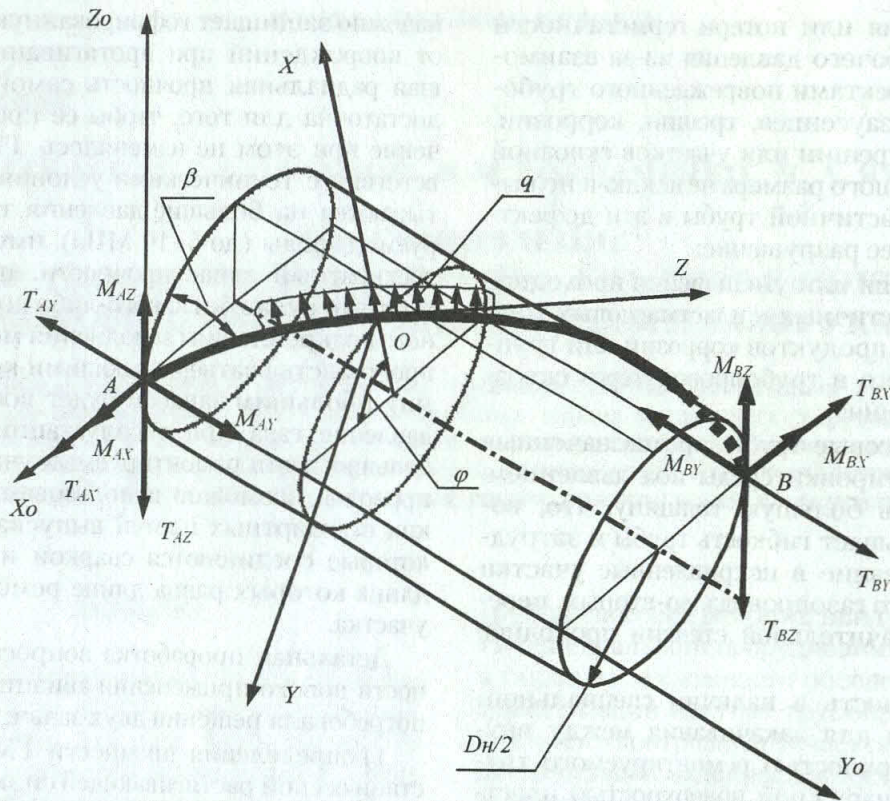


Рис. 1

В общем случае рассматриваемый полувиток нагружен на концах (в точках A и B) силой и моментом, которые разложены на осевые составляющие в начальной системе координат X_o, Y_o, Z_o (в точках A и B эти силы и моменты равны по величине и противоположны по направлению из условий симметрии нагружения), а также распределенной нагрузкой q по всей длине винтовой линии от взаимодействия с условным жестким в радиальном направлении цилиндром. Здесь следует заметить, что радиальные перемещения точек на вершинах гофров гофрированной оболочки при нагружении как внутренним давлением, так и осевой силой малы, и поэтому наружный диаметр оболочки практически не меняется. Взаимодействие же цилиндра с оплеткой происходит только за счет натяжения последней. Распределенная нагрузка q действует в каждой отдельно взятой точке на винтовой линии по нормали к цилиндру. Точки взаимодействия цилиндра и проволоки, а также и перекрестных проволок в осевом направлении имеют одинаковые перемещения в случае рассматриваемого симметричного нагружения, и поэтому трением между отдельными проволоками и проволоками и цилиндром пренебрегаем.

Рассматривается равновесное состояние полувитка при нагружении ГМР осевой силой F . Осевая сила T_{AY} , действующая на полувиток, определяется по заданной нагрузке:

$$T_{AY} = F/n, \quad (2)$$

где n — число проволок в оплетке.

Остальные силы и моменты на краях выделенного элемента неизвестны. Сила T_{AZ} связывается с распределенной нагрузкой из уравнения равновесия винтового элемента:

$$Q_Z = 2T_{AZ}, \quad (3)$$

где Q_Z — равнодействующая распределенной нагрузки, определяемая интегрированием последней по всей длине элемента.

$$Q_Z = \int_0^\pi \frac{q D_H \sin \varphi}{2 \cos \beta} d\varphi. \quad (4)$$

Тогда распределенная нагрузка

$$q = \frac{2T_{AZ} \cos \beta}{D_H}. \quad (5)$$

Уравнения осевой линии проволоки (винтовой линии) в системе координат X_o, Y_o, Z_o :

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} D_n (\cos \varphi - 1), \\ y &= \frac{1}{2} D_n \varphi \operatorname{tg} \beta, \\ z &= \frac{1}{2} D_n \sin \varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

Последующие уравнения и преобразования, выполненные с помощью математического пакета символьных вычислений Maple 7 [1], ввиду их большого объема не приводятся. Решение задачи выполняется в следующей последовательности. В текущем сечении (точке O) винтового элемента оплетки определяются моменты от распределенной нагрузки и сил, приложенных на краях элемента. Эти моменты суммируются в виде осевых составляющих в локальной системе координат X, Y, Z . Далее находятся интегралы, входящие в выражение теоремы Кастилиано и представляющие собой частные производные потенциальной энергии деформированного полувитка по каждой из обобщенных сил, т. е. по неизвестным силам и моментам в краевых сечениях. Разрешающие уравнения получаются приравниванием этих интегралов соответствующим перемещениям на краях витка. Результатом являются значения усилий и моментов в сечении проволоки, по которым можно определить максимальные напряжения. Вся методика реализована в расчетной программе. Выполнен расчет напряжений в проволоке оплетки ГМР ($D_y = 50$ мм) при нагружении внутренним давлением 1 МПа, что соответствует осевой силе 2770 Н. Напряжения от изгибающих и крутящего моментов пренебрежимо малы. Напряжения от растягивающей силы составляют 51 Н/мм², что гораздо ниже допускаемых для материала проволоки на растяжение. Учитывая, что зависимость напряжений от нагрузки ГМР в принятой модели линейная, а допускаемые напряжения $[\sigma] = 300$ Н/мм², для этого типа ГМР теоретическое значение предельно допустимой растягивающей силы $T_{пр} = 16600$ Н.

3. РАСЧЕТ УСИЛИЯ ПРОТЯГИВАНИЯ ГМР В ВОССТАНАВЛИВАЕМЫЙ УЧАСТОК ГАЗОПРОВОДА

Сила протягивания зависит от сил трения, возникающих в зонах соприкосновения ГМР с внутренней поверхностью газопровода. Силы трения в свою очередь определяются силами давления ГМР на стенку газопровода.

Очевидно, что максимальные силы давления могут возникнуть в местах изгиба газопровода или излома его осевой линии (места соединения труб под некоторым углом друг к другу). В качестве расчетной принята схема, представленная на рис. 2, на котором показано место излома осевой линии газопровода, характеризуемого углом θ .

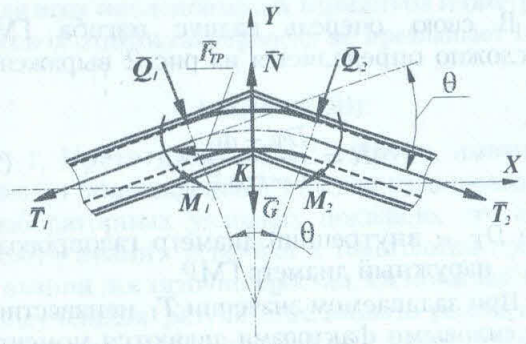


Рис. 2

Рассматривается равновесие (имеется в виду предельное состояние равновесия или протягивание с постоянной скоростью) части ГМР, ограниченной углом излома трубы θ , в предположении, что форма осевой линии изогнутой части ГМР — окружность. Излом трубы предполагается в вертикальной плоскости, в этом случае взаимодействие ГМР с трубой будет максимальным, так как сила давления от изгиба рукава и его сила тяжести окажутся направленными в одну сторону. Взаимодействие выделенного участка ГМР с трубой считается происходящим в точке K (в случае не излома, а изгиба газопровода по плавной линии, может быть принята та же расчетная схема, так как из-за того, что наружный диаметр ГМР гарантированно меньше внутреннего диаметра трубы, ГМР будет иметь больший радиус изгиба, чем радиус изгиба трубы, и соприкосновение ГМР с трубой все равно будет происходить в одной точке). В этой точке на ГМР действуют нормальная сила реакции трубы N и сила трения $F_{тр}$. На краях выделенного участка действуют моменты M_1 и M_2 , поперечные силы Q_1 и Q_2 и продольные силы T_1 и T_2 , первую из которых можно считать силой протягивания предыдущей части ГМР (в случае отсутствия такой части силу T_1 можно задавать равной нулю), а вторую — искомой силой протягивания рассматриваемого участка со всей, следующей за ним частью ГМР.

Вес рассматриваемого участка ГМР определяется формулой

$$G = \gamma L, \quad (7)$$

где γ — погонный вес ГМР; L — длина участка, которая определяется как длина дуги окружности:

$$L = R\theta. \quad (8)$$

В свою очередь радиус изгиба ГМР несложно определяется из рис. 2 выражением

$$R = \frac{D_T - d_P}{1 - \cos \frac{\theta}{2}}, \quad (9)$$

где D_T — внутренний диаметр газопровода; d_P — наружный диаметр ГМР.

При задаваемом значении T_1 неизвестными силовыми факторами являются моменты M_1 и M_2 , поперечные силы Q_1 и Q_2 , нормальная реакция N и искомая сила протягивания T_2 . Максимальная величина силы трения будет в состоянии предельного равновесия и при известном статическом коэффициенте трения f находится по закону Кулона

$$F_{TP} = fN. \quad (10)$$

Задача является трижды статически неопределимой. Точное ее решение нецелесообразно, так как в любом случае не может быть точно оценен коэффициент трения f . Для упрощения решения введем следующие допущения:

— силы Q_1 и Q_2 предполагаем равными по величине;

— вертикальные составляющие этих сил приближенно определим исходя из известной

схемы двухопорной балки, нагруженной посередине силой P и получившей при этом прогиб, при котором в опорных точках угол поворота оказался равным $\theta/2$ [2]:

$$\begin{aligned} Q_1 \cos \frac{\theta}{2} = Q_2 \cos \frac{\theta}{2} = \frac{P}{2} = \\ = \frac{1}{2} \cdot \frac{16(EJ)}{l^2} \cdot \frac{\theta}{2}, \quad (11) \end{aligned}$$

где l — длина балки (в нашем случае можно считать $l = L$), EJ — изгибная жесткость балки, т. е. изгибная жесткость ГМР.

Принятые допущения позволяют определить силу протягивания T_2 из двух уравнений равновесия выделенного элемента ГМР (рис. 2):

$$\begin{aligned} T_2 \cos \frac{\theta}{2} - T_1 \cos \frac{\theta}{2} - F_{TP} = 0, \\ N - G - (T_1 + T_2) \sin \frac{\theta}{2} - \\ - (Q_1 + Q_2) \cos \frac{\theta}{2} = 0. \quad (12) \end{aligned}$$

В случае, если восстанавливаемый газопровод имеет переменную кривизну или несколько криволинейных участков или изломов, то он условно разбивается на соответствующие части, рассчитываются их веса и применяется предложенный метод расчета последовательно к каждой части с использованием системы уравнений (12) как рекурсивной, т. е. после каждого шага найденная T_2 принимается в последующем шаге равной T_1 .

В соответствии с изложенной методикой для вычисления силы протягивания ГМР в восстанавливаемый газопровод составлена программа для ПЭВМ с использованием математической системы Maple 7.

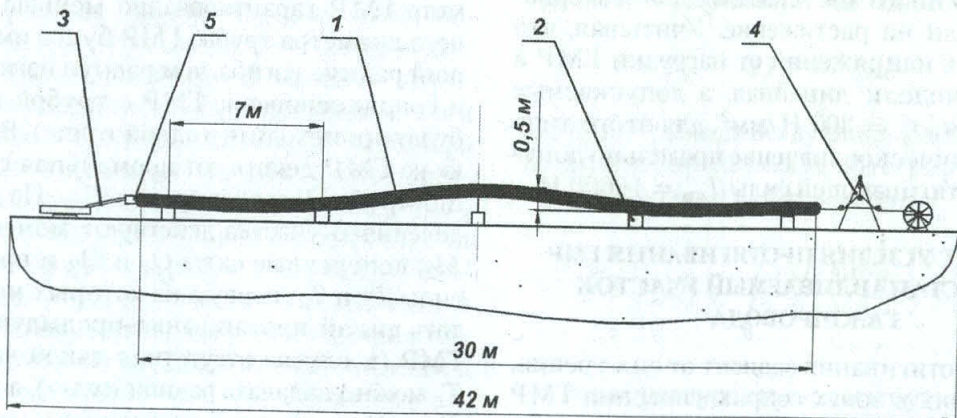


Рис. 3

4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью апробирования предложенного метода ремонта газопроводов в производственном боксе ОАО «Ишимбайгаз» была смонтирована экспериментальная установка для протягивания ГМР в трубопровод, имитирующий поврежденный участок газопровода.

Установка (рис. 3) включает трубу 1 диаметром $D = 89$ мм и длиной $L = 30,2$ м, опорные бетонные блоки 2, на которых крепится труба, гибкий металлический рукав 3, состоящий из шести соединенных сваркой плетей с условным диаметром 50 мм, и устройство для протягивания 4. На входной торец трубы 1 крепится центрирующая втулка с направляющим лотком 5.

Устройство для протягивания 4 снабжено аппаратурой, обеспечивающей возможность непрерывного замера силы протягивания. Протягивание осуществляется плавным вращением бобины, на которую наматывается трос.

Испытания были проведены в соответствии с программой, включающей несколько вариантов геометрии осевой линии трубы. Форма осевой линии трубы менялась подбором высот опорных блоков. По каждой из схем испытаний были построены кривые зависимости силы протягивания от длины протянутой части ГМР. После проведения испытаний проверка показала, что ГМР сохранил герметичность и не имел видимых повреждений.

Обобщая результаты испытаний, можно отметить следующее:

– сила, необходимая для протягивания ГМР в прямой трубопровод, невелика. Максимальное значение силы протягивания равно $T_{\max} = 270$ Н. По этим результатам, учитывая, что вес протянутой части $P = 906$ Н, для оценочных теоретических расчетов силы протягивания получен коэффициент трения $f \approx 0,3$;

– при наличии прогибов трубопровода сила протягивания может увеличиться. Максимальное увеличение силы протягивания возможно в том случае, когда волна прогиба трубопровода располагается в вертикальной плоскости и вершиной вниз. Наличие одного такого прогиба (прогиб, равный 0,4 м на длине трубы, составляющей 14 м) увеличивает силу протягивания на 20–25%. Если вершина волны ориентирована вверх, то сила протягивания даже уменьшается;

– во всех проведенных экспериментах сила протягивания на порядок меньше, чем теоретически определенная для данного ГМР допустимая осевая нагрузка, что говорит о больших резервах ГМР при их использовании в качестве тягового элемента;

– расхождение между экспериментальными и расчетными значениями (полученными с использованием экспериментального коэффициента трения) силы протягивания для всех исследованных вариантов геометрии осевой линии газопровода не превышает 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Протягивание ГМР в трубу, имитирующую поврежденный участок газопровода, в лабораторных условиях показало, что сила протягивания невелика и технология протягивания достаточно простая. Основываясь на полученных результатах, можно рекомендовать к внедрению данный метод ремонта подземных или подводных участков газопроводов, где вскрытие и замена поврежденного участка требуют больших технологических, экономических и временных затрат.

2. Применение ГМР для ремонта газопроводов имеет следующие преимущества перед применением, например, полиэтиленовых труб:

2.1. ГМР имеет большую стойкость к истиранию при протягивании о внутреннюю поверхность трубопровода, покрытую коррозией и имеющую заусенцы.

2.2. ГМР имеет большую радиальную прочность, что, во-первых, исключает, как в случае эластичной полиэтиленовой трубы, возможность выдавливания ее при действии рабочего давления в дефектные области газопровода и дальнейшее разрушение, а во-вторых, также исключает разрушение или уменьшение проходного сечения при осыпании продуктов коррозии или грунта, попадающего в газопровод через сквозные повреждения.

2.3. Для протягивания ГМР в ремонтируемый участок вследствие его большой гибкости не требуется вскрывать большой протяженности прилегающие к ремонтируемому участку газопровода.

2.4. Сварное соединение ГМР с газопроводом не требует специальной арматуры крепления и поэтому является более надежным.

3. К недостаткам предлагаемого метода ремонта относится то, что при установке ГМР уменьшается проходное сечение газопровода. Предварительные расчеты показали, что

падение давления при этом в газопроводах невелико. Так, например, применение ГМР с условным диаметром $d_y = 50$ мм и длиной $l = 35$ м для ремонта газопровода диаметром $D_n = 89$ мм, толщиной стенки $s = 3,5$ мм и длиной $L = 1000$ м приводит к падению давления, составляющему 25% от величины падения давления на данном газопроводе без ГМР. Такие потери давления, учитывая необходимость быстрой и надежной ликвидации аварийных ситуаций, во многих случаях можно считать допустимыми и отмеченный недостаток не считать решающим при выборе предлагаемого метода ремонта газопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дьяконов В. П.** Математическая система MAPLE V R3/R4/R5/. М.: ТОО «СОЛОН», 1998. 400 с.
2. **Биргер И. А., Мавлютов Р. Р.** Сопротивление материалов: Учебное пособие. М.: Наука, 1986. 560 с.

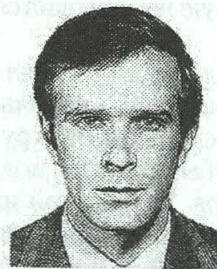
ОБ АВТОРАХ



Итбаев Валерий Каюмович, проф., зав. кафедрой основ конструирования механизмов и машин. Дипл. инж. (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по авиационным двигателям (УГАТУ, 1996). Лауреат Премии Правительства РФ. Заслуж. машиностроитель РБ. Исследования в области динамики и прочности авиационных двигателей.



Султанов Риф Габдуллович, директор ОАО «Ишимбайгаз». Дипл. горн. инж., инж.-электрик (УГНТУ, 1972). Исследования и разработки в области нефтегазового оборудования и автоматики.



Горбаненко Владимир Михайлович, доцент кафедры теоретической механики. Дипл. инж. (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по авиац. двигателям (МАИ, 1979). Исследования в области динамики и прочности сложных механических систем.



Яруллин Чингиз Асхатович, доцент, директор Ишимбайск. филиала УГАТУ. Дипл. инж. по авиац. двигателям (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по динамике полета (МАИ, 1983). Исследования в области механики сложных систем.