

АРМИРОВАННЫЕ ТРУБЫ

С ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОСТОЙКОСТЬЮ

Игорь Гвоздев, Сергей Шаляпин, Сергей Самойлов

Армирование полимерных труб высокопрочными материалами на сегодняшний день является самым эффективным способом увеличения прочности и, следовательно, максимального рабочего давления в трубе при существенном снижении материалоемкости и стоимости труб, без потери их эксплуатационных характеристик.

Многослойная армированная труба состоит из следующих основных элементов:

- внутренняя камера – герметизирующая полимерная оболочка, по которой транспортируется жидкая или газообразная среда под давлением;

- армирующий каркас – слой из высокопрочных материалов (стальные, синтетические, минеральные нити или ленты) нанесенные, чаще всего, в форме сетки на внутреннюю камеру методом обмотки или оплетки. Армирующий слой воспринимает на себя основную нагрузку, возникающую от действия внутреннего давления;

- наружный слой – полимерный слой, закрывающий армирующий каркас, защищая его от механических повреждений и обеспечивающий монолитность конструкции при адгезии к внутренней камере через ячейки сетчатого каркаса.

При проектировании армированной трубы необходимо выбирать материалы каждого из слоев таким образом, чтобы обеспечить работоспособность многослойной конструкции в течение срока эксплуатации трубы при заданных эксплуатационных параметрах.

Для сетей ГВС и отопления с температурой теплоносителя до 95°C и давлением до 1 МПа была спроектирована

труба ДЖИ-ПЕКС-АМТ из сшитого полиэтилена, армированного высокопрочными арамидными нитями. Эти трубы уже на протяжении более 5 лет эксплуатируются в сетях Москвы, Московской области и других регионов нашей страны. Их применение стало настолько эффективным, что было принято решение на основе накопленного производственного и эксплуатационного опыта осваивать новые сферы для использования армированных труб. Первым шагом стало освоение отопительных систем с температурой носителя до 115°C и давлением до 1 МПа. Поскольку для полимеров характерно снижение прочностных и эксплуатационных свойств с повышением температуры, увеличение температуры эксплуатации даже на 20°C потребовало изменений конструкции трубы, усиления армированного каркаса, замены материалов. Именно эту комплексную задачу и предстояло решить при создании труб с повышенной теплостойкостью.

За конструкционную основу была принята труба ДЖИ-ПЕКС-АМТ, но с учетом влияния повышенных температур армирующий каркас был усилен. В качестве внутреннего слоя был выбран модифицированный сшитый полиэтилен, а в качестве наружного слоя – теплостойкий сополимер пропилена с этиленом.

Прочность армированных труб с повышенной теплостойкостью

Армирующий каркас – это основной элемент, определяющий прочность многослойной конструкции, и, соответственно, от материалов, из которых он изготов-

ливаются, требуются высокие прочностные показатели. Применение для этих целей нитей из высокопрочного арамидного волокна позволяет снизить материалоемкость труб до 40% при сохранении эксплуатационных характеристик за счет уменьшения толщины стенки. Как и для всех полимерных материалов, для арамидных волокон характерна температурно-временная зависимость прочности. На сегодняшний день для оценки длительной прочности трубных материалов применяется метод статистической экстраполяции данных, установленный международным стандартом ISO 9080 [1]. В данном стандарте изложена методика по набору и анализу данных, полученных в результате экспериментов по определению прочности при различных температурах и уровнях напряжений в образце в форме трубы.

В работе [2] длительную прочность арамидных волокон определяли при растяжении нитей, а для обработки данных использовался метод, предписанный ISO 9080. Для нитей марки Кевлар-29 фирмы DuPont были получены зависимости при четырех температурах (рис. 1).

При статистической обработке полученных данных было получено обобщенное уравнение температурно-временной зависимости прочности нитей во времени.

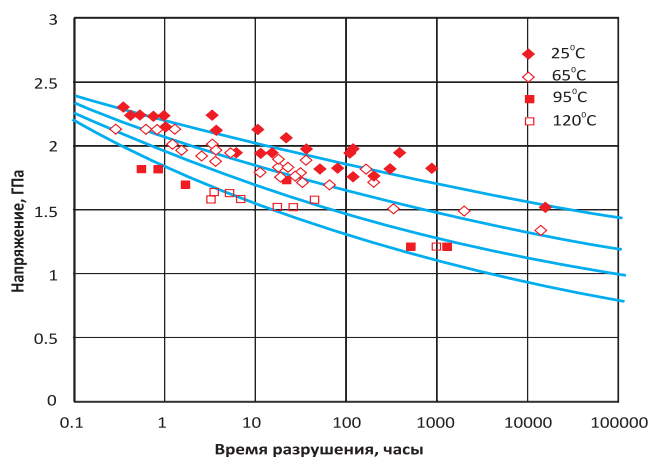
Наиболее распространенной и удобной характеристикой нитей является текс – вес в граммах 1000 м нитей, поэтому удобнее оперировать понятием относительной прочности нити – Н/текс. Для Кевлара-29 относительная прочность составляет примерно 2 Н/текс. При экстраполяции по полученному уравнению на 50 лет для температур 105°C и 120°C значение прочности составит 0,813 Н/текс и 0,731 Н/текс соответственно. С учетом этой зависимости прочности материала армирующего каркаса была спроектирована труба, а прочностной расчет армирующей системы основан на принципах, описанных в статье [3].

Поскольку основную нагрузку под действием внутреннего давления воспринимает на себя армирующий каркас, а внутренняя камера воспринимает лишь минимальные нагрузки, обусловленные конструкцией трубы, то изменение во времени прочности материала камеры не оказывает существенного влияния на несущую способность трубопровода.

Воспринимая нагрузку от внутреннего давления, армирующий каркас деформируется на величину, не превышающую удлинения при разрыве материала каркаса. Для арамидных волокон удлинение составляет 2,5–3%. Расчет показывает [4], что при принятых конструктивных габаритах внутренняя камера и наружное покрытие воспринимают не более 4% от внутреннего давления. При номинальном рабочем давлении 1 МПа напряжение в стенке внутренней камеры будет равным 0,35–0,4 МПа.

Способность оболочки из модифицированного сшитого полиэтилена выдерживать такие напряжения при повышенных температурах была подтверждена испыта-

Рис. 1. Длительная прочность Кевлар-29



ниями труб ДЖИ-ПЕКС диаметром 32 мм SDR 11 и диаметром 90 мм с толщиной стенки 4 мм при 110°C и напряжении 2,5 МПа. Образцы труб выдержали испытания в течение 13 600 часов без разрушения при требованиях нормативной документации по времени до разрушения 8760 часов [5].

Результаты испытаний опытных образцов

Для того, чтобы спроектировать трубу на заданный срок эксплуатации (50 лет) в сетях с температурой до 115°C, необходимо определить времена работы трубы при различных температурах теплоносителя на весь срок службы. Данный вопрос является далеко не простым, поскольку каждая теплосетевая компания имеет свой температурный график в зависимости от температуры окружающей среды. Для решения этой задачи был взят модельный температурный график с наиболее жесткими тепловыми нагрузками из большого набора температурных графиков в теплосетях в разных регионах страны.

Метод определения модельного температурного графика был следующим:

1. Были проанализированы реальные временные зависимости температуры теплоносителя в большом количестве теплосетей с температурными графиками 115°C/70°C и 110°C/70°C. Для анализа был выбран самый холодный отопительный сезон за последние 10 лет – таковым оказался отопительный сезон 2009–2010 гг.
2. Анализ проводили по теплосетевым компаниям в различных регионах страны, включая районы Сибири с максимальными нагрузками на теплосети в пиковые периоды и с наибольшей продолжительностью отопительного сезона.
3. Из всего массива данных был выбран температурный график самого холодного месяца в указанный отопи-

тельный сезон 2009–2010 гг. и в самой «горячей» теплотрассе. Таковым оказался график Омской теплотрассовой компании (МП г. Омска «Тепловая компания») в феврале 2010 г.

4. Исходя из предположения о том, что в течение всех месяцев отопительного сезона на протяжении всех 50 лет эксплуатации труб расчетный температурный график будет именно таким, каким он был в Омской теплотрассовой компании в самый тяжелый месяц за последние 10 отопительных сезонов, был смоделирован наиболее жесткий температурный график (таблица 1), в котором могут эксплуатироваться трубы с рабочей температурой до 115°C.

Для построения температурно-временной зависимости прочности труб были проведены испытания опытных образцов трубы на стойкость к внутреннему давлению. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 24157–80 [6] в термошкафах, имитирующих реальные условия эксплуатации трубопровода, а результаты обрабатывали в соответствии с методикой ISO 9080.

На рис. 3 представлены результаты испытаний и температурно-временные зависимости прочности трубы, рассчитанные по уравнению, полученному после статистической обработки данных по ISO 9080 с нижним доверительным интервалом при вероятности 97,5% (LPL). Для армированной трубы не существует понятия «напряжение в стенке трубы», так как все слои

Рис. 2. Образцы труб ИЗОПРОФЛЕКС в термошкафу



Таблица 1. Заданный температурный график трубопровода тепловой сети

| Температура теплоносителя, °С | Время работы | |
|-------------------------------|--------------|------|
| | сутки | часы |
| 95 | 110 | 2640 |
| 100 | 75 | 1800 |
| 105 | 25 | 600 |
| 110 | 2,5 | 60 |
| 115 | 0,5 | 12 |
| Всего | 233 | 5112 |

многослойной конструкции нагружены по-разному. Поэтому уравнение представлено как функция давления в виде:

$$\lg t = B_0 + B_1 / T \cdot \lg P + B_2 / T + B_3 \cdot \lg P \quad (1)$$

где

t – время эксплуатации (срок службы), ч;

P – давление в трубе, МПа;

T – температура, К;

B_0, B_1, B_2, B_3 – расчетные коэффициенты, определяющие прочность материала.

Конечное обобщенное уравнение длительной прочности, рассчитанное по результатам испытаний в системе «вода–воздух», имеет вид:

$$\lg t = -81,34 - 32617 / T \cdot \lg P + 34050 / T + 72,21 \cdot \lg P \quad (2)$$

Для расчета максимального допустимого напряжения для труб, подверженных действию различного внутреннего давления и/или переменным температурам на протяжении их срока эксплуатации, используется метод, предписанный ISO 13760 [6]. Данный эмпирический метод известен как правило Майнера и в случае армированных труб может быть использован для расчета максимального допустимого рабочего давления в трубе при различных режимах и сроках эксплуатации.

Правило Майнера основано на следующих допущениях:

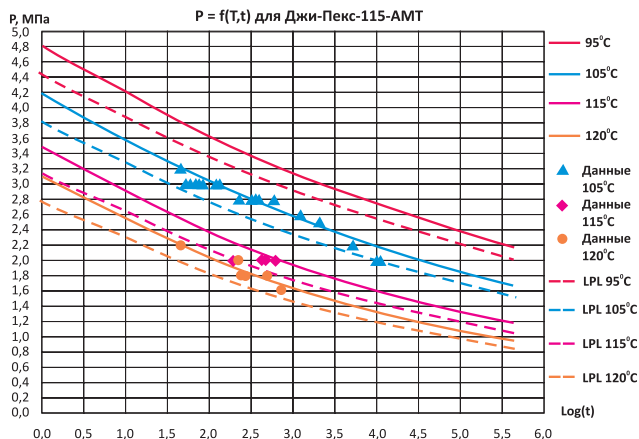
а) Суммарное повреждение материала или продукта определяется с допущением, что определенный характер воздействия является постоянным (100%).

б) При постоянных условиях полученное повреждение пропорционально продолжительности воздействия. Материал или продукт будет выдерживать воздействие вплоть до разрушения.

в) Если материал подвергается воздействию не непрерывно, а только на протяжении части года (т.е. a_i % от года, вместо 100%), годовое повреждение будет не $100 / t_i$ %, а a_i / t_i %.

г) В случае повреждений одинакового характера, но при различных наборах условий (различная жесткость,

Рис. 3. Расчетные зависимости длительной прочности и результаты испытаний труб ДЖИ-ПЕКС-115-АМТ



температура, давление, напряжение и т. д.), суммарное повреждение за год будет комбинированным эффектом различных наборов условий. Правило аддитивности состоит в том, что разделенные значения повреждения могут быть суммированы. Результатом будет общее повреждение при различных условиях.

Используя температурно-временную зависимость прочности труб, вычисляют предельное время работы t_i трубопровода при различных температурах теплоносителя, при этом в расчете предсказываемое рабочее давление умножают на коэффициент запаса прочности, зависящий от температуры эксплуатации.

Общее значение накопленных повреждений при длительной эксплуатации (TYD) рассчитывают по формуле:

$$TYD = \sum \frac{a_i}{t_i} \tag{3}$$

где a_i – доля времени работы при заданных условиях за годовой период работы трубопровода, %;

t_i – предельное время работы трубопровода при заданной температуре, ч.

Максимальное допустимое время эксплуатации t_x в часах рассчитывают по формуле

$$t_x = \frac{100}{TYD} \tag{4}$$

Если расчетный срок службы отличается от заданного, в расчет по уравнению длительной прочности вводят другое значение рабочего давления и методом последовательного приближения вычисляют рабочее давление для заданного срока службы.

Используя изложенный принцип расчета, можно проводить проверку работоспособности трубопровода в заданных условиях эксплуатации или выбирать параметры трубопровода для требуемых условий эксплуатации.

В таблице 2 приведены результаты расчета срока эксплуатации трубы с температурным режимом по таблице 1 и давлении 11 бар. Время работоспособности трубопровода t_i для каждой температуры рассчитано по уравнению (2). Рабочее давление, рассчитанное методом последовательного приближения для срока эксплуатации 50 лет, составляет 11 бар. При этом коэффициент запаса прочности для температур с наибольшей долей времени работы принят равным 1,5.

Для подтверждения работоспособности труб ДЖИ-ПЕКС-115-АМТ в реальных условиях на РТЭС Люблино (Москва, ОАО МОЭК) был организован полигон для проведения испытаний экспериментального участка трубопровода ИЗОПРОФЛЕКС-115А 90/125, внутренняя напорная труба которого ДЖИ-ПЕКС-115-АМТ 90.

Для расчета режима испытания учитывали доли временного воздействия температур, полученные из реальных температурных графиков, предоставленных специалистами ОАО МОЭК. Исходя из полученного графика и прогнозируемого срока испытания, было рассчитано давление с уменьшенным коэффициентом запаса для

Таблица 2. Расчет срока эксплуатации труб ДЖИ-ПЕКС-115-АМТ

| Температура теплоносителя, °С | Доля времени, a_i , % | Расчетное время t_i , ч | Коэффициент запаса прочности | a_i/t_i |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|--|
| 95 | 51,64 | $6,57 \cdot 10^6$ | 1,5 | $7,87 \cdot 10^{-6}$ |
| 100 | 35,21 | $7,14 \cdot 10^5$ | 1,5 | $4,93 \cdot 10^{-5}$ |
| 105 | 11,74 | $8,24 \cdot 10^4$ | 1,5 | $1,42 \cdot 10^{-4}$ |
| 110 | 1,17 | $6,42 \cdot 10^4$ | 1,3 | $1,83 \cdot 10^{-5}$ |
| 115 | 0,23 | $1,59 \cdot 10^5$ | 1 | $1,48 \cdot 10^{-4}$ |
| Сумма | 100 | | TYD | $2,19 \cdot 10^{-4}$ |

$$t_x = 100/TYD = 100/2,19 \cdot 10^{-4}/8760=52 \text{ года}$$



Рис. 4. Испытания труб ИЗОПРОФЛЕКС на полигоне РТЭС Люблино

оценки работоспособности экспериментального трубопровода. Поддерживать температуру теплоносителя в трубе постоянной не удавалось, поэтому температуру регистрировали каждую минуту, затем рассчитывали время воздействия температуры в часах и усредняли по заданному диапазону температур в интервале $\pm 5^{\circ}\text{C}$. При постоянном мониторинге режим испытания корректировали по давлению и температуре.

График изменения температуры и давления в трубопроводе представлен на рис. 5, а усредненные времена воздействия температур – в таблице 3.

Расчет срока службы по правилу Майнера и уравнению (2) температурно-временной зависимости для полученного температурного графика представлен в таблице 4.

Общее время работы трубопровода (2139 часов) в опытных условиях эксплуатации превысило расчетное без разрушения трубы на опытном участке.

Кроме того, полученные доли временного воздействия повышенных температур при опытной эксплуатации значительно превышают доли, принятые для температурного графика первичного контура отопительных сетей. За указанный период также были и резкие скачки температуры выше 120°C , в общей сложности время воздействия критической температуры ($\geq 120^{\circ}\text{C}$) составило около 2 часов, а выше максимально допустимой рабочей температуры ($\geq 115^{\circ}\text{C}$) – более суток, что составляет годовую норму для 115°C .

Таблица 3. Продолжительность воздействия температур в процессе испытания

| Температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$ | 5 | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 | Всего |
|---|------|-------|------|-------|-----|-----|-------|
| Время испытания при $P=15$ бар, ч | 262 | 243 | 257 | 61 | 4 | 1 | 828 |
| Время испытания при $P=18$ бар, ч | 298 | 141 | 254 | 451 | 146 | 21 | 1311 |
| Общее время испытания, ч | 560 | 384 | 511 | 512 | 150 | 22 | 2139 |
| Доля времени, a_i , % | 26,2 | 17,95 | 23,9 | 23,95 | 7 | 1 | 100 |

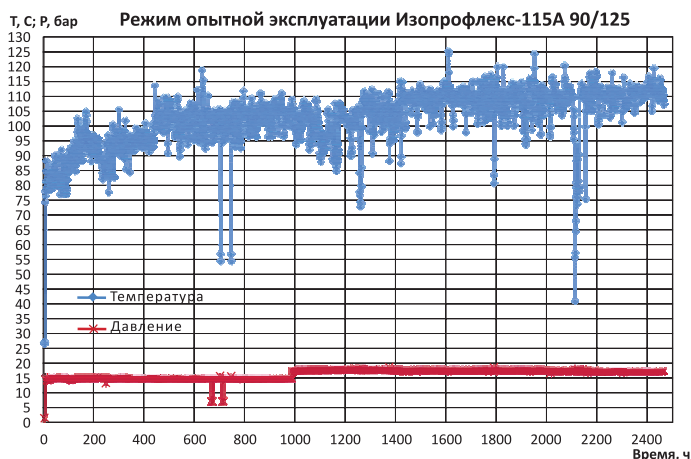


Рис. 5. Параметры испытаний экспериментального участка трубопровода ИЗОПРОФЛЕКС-115А

Максимальное же значение температуры во время испытаний составило 127°C .

Таким образом, на основании результатов лабораторных испытаний опытных образцов и испытания опытного трубопровода установлено, что многослойные армированные трубы ДЖИ-ПЕК-115-АМТ с тепловой изоляцией могут эксплуатироваться в сетях отопления с максимальным рабочим давлением до 1 МПа и температурой теплоносителя до 115°C до 50 лет.

Список литературы

1. Plastics piping and ducting systems – Determination of long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. – ISO 9080, 2003.
2. G. M. Fallatah, N. Dobbs, A.G. Gibson. Long term creep and stress rupture of aramid fibre. – Plastics, Rubber and Composites, 2007 vol. 36 № 9.
3. Горилловский М.И., Гвоздев И.В., Швабауэр В.В. К вопросу прочностного расчета армированных полимерных труб. – Полимерные трубы, №2, 2005.
4. Лепетов В.А., Юрцев Л.Н. Расчеты и конструирование резиновых изделий и технологической оснастки. М.: Истек, 2006.
5. Plastics piping systems for hot and cold water installations – crosslinked polyethylene (PEX) – pipes, ISO 15875-2, 2003.
6. Plastics pipes for conveyance of fluids under pressure – Miner’s rule – Calculation method for cumulative damage, EN ISO 13760, 1998.

Таблица 4. Расчет суммарного коэффициента накопленных повреждений

| Температура теплоносителя, С | Время воздействия, часы | Доля времени, a_i , % | Расчетное время t_i , ч | Коэффициент запаса прочности | a_i/t_i |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------|
| P=15 бар | | | | | |
| 95 | 262 | 12,25 | $5,05 \cdot 10^6$ | 1,25 | $2,43 \cdot 10^{-6}$ |
| 100 | 243 | 11,36 | $6,13 \cdot 10^5$ | 1,25 | $1,85 \cdot 10^{-5}$ |
| 105 | 257 | 12,01 | $7,86 \cdot 10^4$ | 1,25 | $1,53 \cdot 10^{-4}$ |
| 110 | 61 | 2,85 | $1,06 \cdot 10^4$ | 1,25 | $2,68 \cdot 10^{-4}$ |
| 115 | 4 | 0,19 | $2,46 \cdot 10^4$ | 1,2 | $7,60 \cdot 10^{-5}$ |
| 120 | 1 | 0,05 | $2,52 \cdot 10^4$ | 1 | $1,85 \cdot 10^{-5}$ |
| Сумма | 828 | 38,71 | TYD ₁ | | $5,36 \cdot 10^{-4}$ |
| P=18 бар | | | | | |
| 95 | 298 | 13,93 | $2,53 \cdot 10^5$ | 1,25 | $5,51 \cdot 10^{-5}$ |
| 100 | 141 | 6,59 | $3,81 \cdot 10^4$ | 1,25 | $1,73 \cdot 10^{-4}$ |
| 105 | 254 | 11,87 | $6,03 \cdot 10^3$ | 1,25 | $1,97 \cdot 10^{-3}$ |
| 110 | 451 | 21,08 | $1,00 \cdot 10^3$ | 1,25 | $2,10 \cdot 10^{-2}$ |
| 115 | 146 | 6,83 | $2,83 \cdot 10^2$ | 1,2 | $2,41 \cdot 10^{-2}$ |
| 120 | 21 | 0,98 | $3,53 \cdot 10^2$ | 1 | $2,7 \cdot 10^{-3}$ |
| Сумма | 1311 | 61,29 | TYD ₂ | | $5,01 \cdot 10^{-2}$ |
| Итого | 2139 | 100 | TYD _Σ | | $5,06 \cdot 10^{-2}$ |

$$t_x = 100 / \text{TYD}_{\Sigma} = 100 / 5,06 \cdot 10^{-2} = 1975 \text{ часов}$$

Анализ одной аварии

Своеобразным испытанием армированных труб ИЗОПРОФЛЕКС на теплоустойчивость стала недавняя авария, произошедшая на одном из участков теплосети в Москве в январе 2011 г. После шумного «разбора полетов» оказалось, что труба ИЗОПРОФЛЕКС-95А диаметром 90 мм, рассчитанная на рабочую температуру 95°C, была врезана в первичный контур сети отопления с температурным графиком 130°C/70°C. Температура теплоносителя в момент аварии составляла 111°C при постоянном давлении в сети 0,8 МПа. Но самым интересным оказалась временная зависимость температуры теплоносителя за три последних отопительных сезона. Выяснилось, что в самый холодный отопительный сезон 2009–2010 гг. температура теплоносителя достигала 127,3°C при том же давлении в 0,8 МПа!

Интересно также то, что разрыв трубы произошел на границе труба–

фитинг по причине выдергивания армирующих нитей из фитинга. Это означает, что сама труба, видимо, могла выдержать и большие нагрузки.

Несмотря на всю серьезность ситуации – труба работала не в штатном режиме и с сильной перегрузкой – данные по этой аварии являются крайне интересными с экспериментальной точки зрения. И именно такие полевые испытания труб на реальных тепловых сетях с запредельными тепловыми нагрузками представляют наибольший интерес для эксплуатационных служб теплосетевых компаний.

Чтобы понять условия, при которых работала данная аварийная труба, были подробно проанализированы температурные режимы эксплуатации. Результаты анализа приведены в таблице.

Из таблицы видно, что аварийная труба проработала в нештатном режиме (при температуре больше 95°C) 4320 часов. При этом 144 часа (6 суток)

труба эксплуатировалась при температуре теплоносителя более 120°C – при значении рабочей температуры, указанном в Технических условиях, 95°C!

Приведенные данные очередной раз подтверждают, что трубы ИЗОПРОФЛЕКС по праву относятся к классу гибких тепловых труб повышенной надежности.

Работа аварийной трубы ИЗОПРОФЛЕКС-95А при температуре более 95°C за период с 2008 по 2011 гг.

| Температурный диапазон, °С | Время работы | |
|----------------------------|--------------|--------------|
| | сут. | ч |
| 95–100 | 40 | 960 |
| 100–105 | 55 | 1 320 |
| 105–110 | 29 | 696 |
| 110–115 | 35 | 840 |
| 115–120 | 15 | 360 |
| 120–125 | 3 | 72 |
| 125–127,3 | 3 | 72 |
| Всего | 180 | 4 320 |