

Получение и измерение вакуума (2.3.5)

Лавыгин Кирилл

07.03.23

1 Введение

Аннотация: В ходе работы на предоставленной установке при помощи манометров различного вида будут определены объемы различных частей установки, а также скорость откачки системы (двумя различными способами).

2 Экспериментальная установка

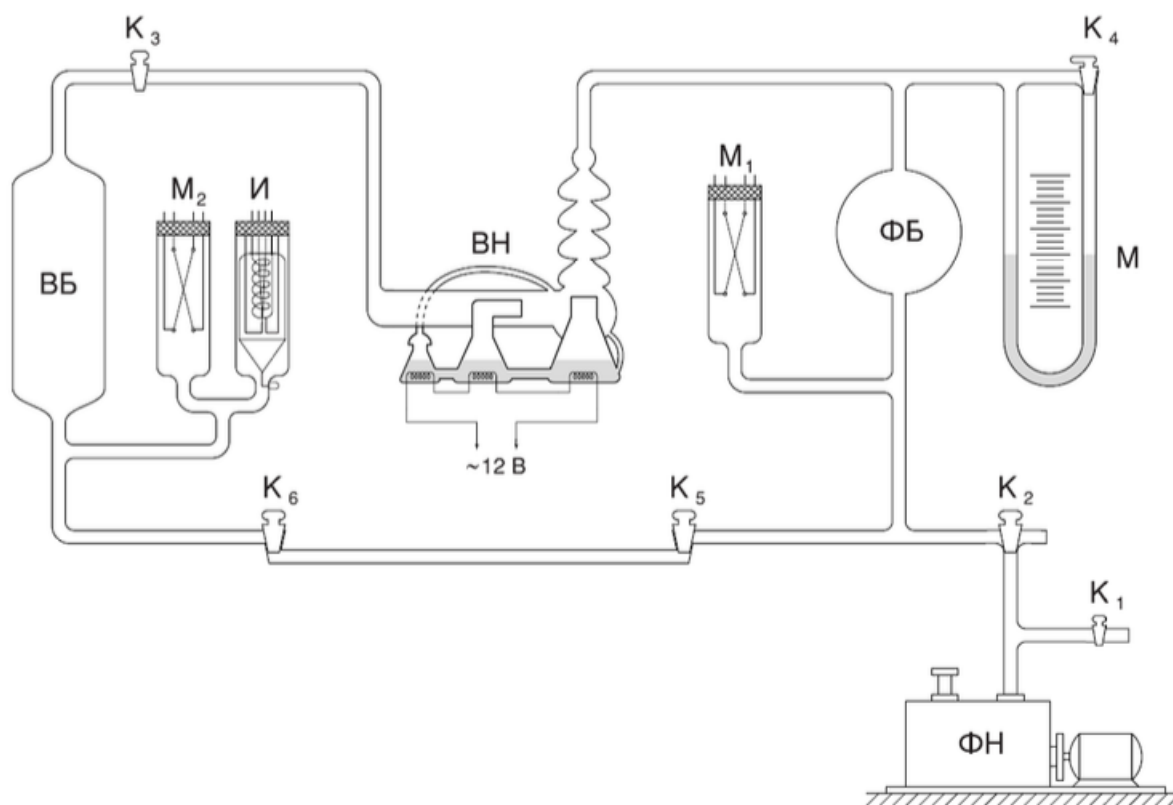


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Установка изготовлена из стекла, и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термпарных манометров (M_1 и M_2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов ($K_1, K_2, \dots K_6$) (Рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

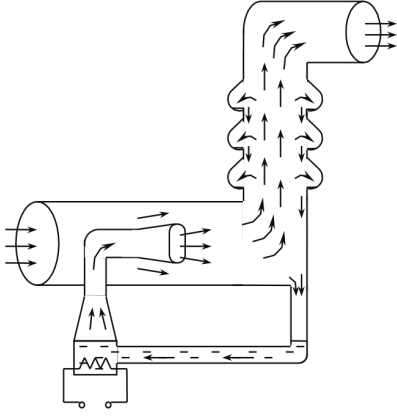


Рис. 2: Схема работы высоковакуумного насоса

Устройство масляного диффузионного насоса схематически показано на Рис. 2 (в лабораторной установке используется несколько откачивающих ступеней). Масло, налитое в сосуд, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе и вырываются из сопла. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку. Далее смесь попадает в вертикальную трубу. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников после чего стекает вниз, а оставшийся газ откачивается форвакуумным насосом.

3 Теоретические сведения

3.1 Процесс откачки

Опишем процесс откачки математически: Пусть W — объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени, Q_i для различных значений i обозначим различные притоки газа в сосуд (в единицах PV), такие как течи извне $Q_{\text{и}}$, десорбция с поверхностей внутри сосуда $Q_{\text{д}}$, обратный ток через насос $Q_{\text{н}}$. Тогда имеем:

$$-VdP = \left(PW - \sum Q_i \right) dt$$

При достижении предельного вакуума устанавливается $P_{\text{пр}}$, и $dP = 0$. В таком случае:

$$W = \left(\sum Q_i \right) / P_{\text{пр}}$$

Поскольку обычно $Q_{\text{и}}$ постоянно, а $Q_{\text{н}}$ и $Q_{\text{д}}$ слабо зависят от времени, также считая постоянной W , можем проинтегрировать (1) и получить:

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp \left(-\frac{W}{V} t \right) \quad (1)$$

Полная скорость откачки W , собственная скорость откачки насоса $W_{\text{н}}$ и проводимости элементов системы C_1, C_2, \dots соотносятся согласно формуле (4), и это учтено в конструкции установки.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

3.2 Течение газа через трубу

Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном и форвакуумном давлениях длина свободного пробега меньше диаметра трубок, и течение газа определяется его вязкостью, т.е. взаимодействием молекул. При переходе к высокому вакууму столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем соударения со стенками.

Для количества газа, протекающего через трубу длины l и радиуса r в условиях высокого вакуума, справедлива формула:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \cdot \frac{P_2 - P_1}{l}$$

Если труба соединяет установку с насосом, то давлением P_1 у его конца можно пренебречь. Давление в сосуде $P = P_2$. Тогда пропускная способность трубы:

$$C_{\text{тр}} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\text{тр}} = \frac{4r^3}{3l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (2)$$

4 Ход работы

4.1 Определение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Перед началом работы проверим, что все краны приведены в правильное положение.
2. Запустим воздух в систему (для этого нужно открыть кран K_2 и подождать пару минут пока воздух заполнит установку).
3. Запустим форвакуумный насос, чтобы он откачал воздух из установки.

Пронаблюдаем за тем, как давление в установке уменьшается и продолжим откачку до момента, пока давление не будет порядка 10^{-2} торр.

4. Отсоединим установку от форвакуумного насоса, а затем объем, заключенный в кранах и капиллярах форвакуумной части, откроем на всю форвакуумную часть. Тогда давление изменится
5. Запишем показания масляного манометра, а именно высоту масла в обоих коленях:

$$h_1 = (37.8 \pm 0.1) \text{ см (в правом колене)}, \quad h_2 = (11.1 \pm 0.1) \text{ см (в левом колене)},$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{h_1}^2 + \sigma_{h_2}^2} = 0.16 \text{ см} \quad \Delta h_{\text{фв}} = h_1 - h_2 (26.7 \pm 0.16) \text{ см.}$$

6. Зная объем запертой части установки (вместе с кранами) $V_{\text{кап}} = 50 \text{ см}^3$, $P_{\text{атм}} = 735.9 \text{ мм.рт.ст.}$, $P_0 = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ мм.рт.ст.}$ (начальное давление в установке), $\rho = 0.885 \text{ г/см}^3$ (плотность масла), вычислим объем форвакуумной части установки.

$$V_{\text{фв}} = \frac{P_{\text{атм}} - P_0}{\rho g \Delta h_{\text{фв}}} V_{\text{кап}} \approx 2117.7 \text{ мл}, \quad \varepsilon_{V_{\text{фв}}} = \varepsilon_{\Delta h} \approx 0.6 \text{ \%}.$$

$$V_{\text{фв}} = (2.117 \pm 0.013) \text{ л}$$

7. Проведем те же самые измерения с высоковакуумной части и получим объем установки, из которой вычитанием объема форвакуумной части получается объем высоковакуумной части.

$$h_3 = (33.3 \pm 0.1) \text{ см}, \quad h_4 = (16.2 \pm 0.1) \text{ см},$$

$$\Delta h_{\text{полн}} = (17.1 \pm 0.16) \text{ см.}$$

Погрешности высот определяются аналогично предыдущему пункту. Как и формула для полного объема установки, тогда:

$$V_{\text{полн}} = \frac{P_{\text{А}} P_{\text{атм}} - P_0}{\rho g \Delta h_{\text{полн}}} V_{\text{кап}} \approx 3307 \text{ мл}, \quad \varepsilon_{V_{\text{полн}}} = \varepsilon_{\Delta h} \approx 0.6 \text{ \%}.$$

$$V_{\text{полн}} = (3.310 \pm 0.02) \text{ л}$$

В результате искомая величина равна:

$$V_{\text{вв}} = V_{\text{полн}} - V_{\text{фв}} = 1.193 \text{ л}, \quad \sigma_{V_{\text{вв}}} = \sqrt{\sigma_{V_{\text{полн}}}^2 + \sigma_{V_{\text{фв}}}^2} \approx 0.003 \text{ л},$$

$$V_{\text{вв}} = (1.193 \pm 0.003) \text{ л}.$$

4.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

8. Не выключая форвакуумного насоса убедимся в том, что в установке не осталось запертых объемов.
9. Откачав установку до давления порядка 10^{-4} торр, приступим к откачке ВБ с помощью диффузионного насоса.
10. С помощью ионизационного манометра измерим значение предельного давления в системе со стороны высоковакуумной части:

$$P_{\text{пр}} = (4,7 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ торр}.$$

11. Найдем скорость откачки по ухудшению и улучшению вакуума, для этого открывая и закрывая кран K_3 будем то подключать насос к объему, то отключать его, при этом на видео зафиксируем показания манометра от времени и построим графики необходимых зависимостей (каких именно подробнее описано в соответствующих пунктах ниже), для которых определим коэффициенты наклона прямых и их погрешности (с помощью МНК).

$$\sigma_{\ln(P-P_{\text{пр}})} = 2 \frac{\sigma_P}{P - P_{\text{пр}}}, \quad \sigma_t = 0.5 \text{ с (минимальное время обновления прибора)}$$

$$\sigma_k^{\text{сист}} \approx -2k \frac{\sigma_P}{(P - P_{\text{пр}}) \ln(P - P_{\text{пр}})} = 0.006 \text{ 1/с}$$

$$\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_V^2 + \varepsilon_k^2} = 0.01 \text{ л/с}, \quad \varepsilon_k = \frac{k_1 - k_2}{k_{\text{ср}}} = 0.2$$

Для случая улучшения вакуума воспользуемся формулой (1) и построим график зависимости $(\ln((P - P_{\text{пр}})/P_1))$ от t . По виду графика видно, что наша модель работает хорошо только для $t < 15$ с, поэтому при расчёте коэффициентов использовались только они. (первые 3 точки второго опыта так же не учитывались) При построении такого графика из МНК получим коэффициент наклона — k , с помощью которого можно найти $W = -kV$.

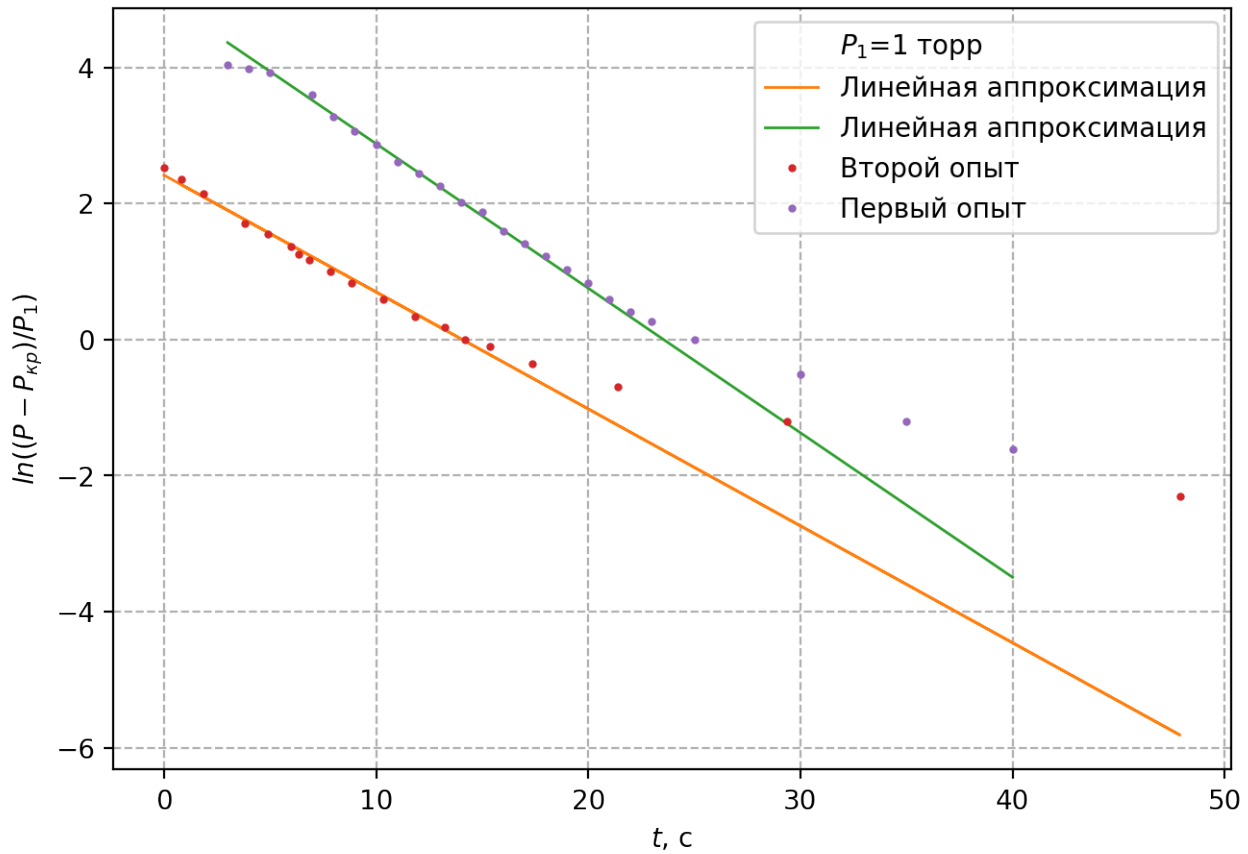


Рис. 3: Улучшение вакуума 1

$k, \frac{1}{c}$	$\sigma_k^{\text{сл}}, \frac{1}{c}$	$\sigma_k, \frac{1}{c}$	$k_{\text{ср}}, \frac{1}{c}$	$W, \frac{\text{л}}{c}$	$\sigma_W, \frac{\text{л}}{c}$
-0.171	0.005	0.02	-0.19	0.23	0.02
-0.212	0.006	0.04			

Таблица 1: Коэффициенты наклона при улучшении вакуума

Как можно видеть, основная погрешность кроется именно в случайности начальных условий опыта, так как при небольшой погрешности в рамках одного опыта, различные опыты дают достаточно отличающиеся значения. Так-же предложенная модель насоса работает лишь при достаточно большой разнице концентраций, что хорошо видно из графика

- Оценим величину потока газа $Q_{\text{н}}$. Для этого воспользуемся данными, полученными при ухудшении вакуума. А именно построим графики зависимости $P(t)$ и определим для них коэффициенты угла наклона прямой.

$$\sigma_k^{\text{сист}} \approx k\sigma_p/p = 0.1 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{торр}}{c}$$

Поскольку $V_{\text{вв}}dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})dt$ получим $(Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) = kV_{\text{вв}}$. По графикам получаем:

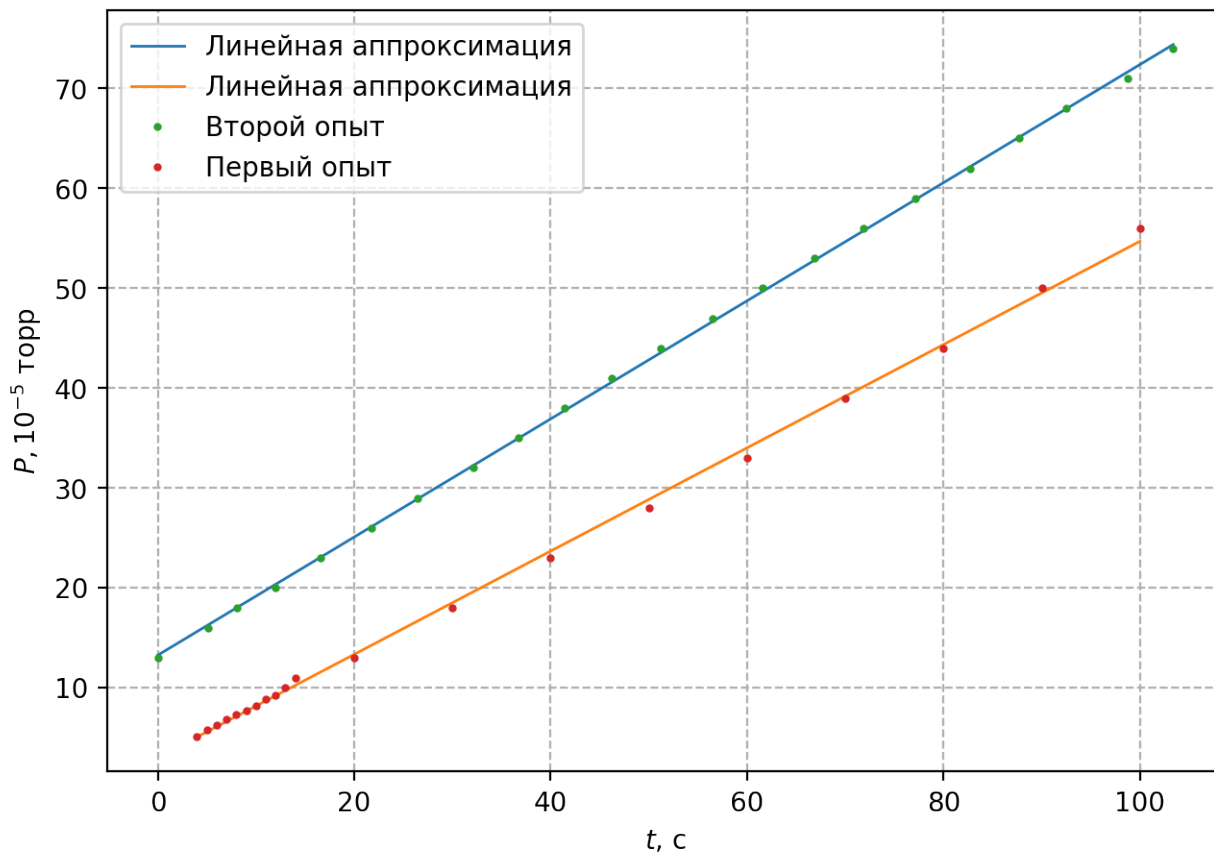


Рис. 4: Ухудшение вакуума 1

$k \cdot 10^6, \frac{\text{торр}}{\text{с}}$	$\sigma_k^{\text{сл}} \cdot 10^6, \frac{\text{торр}}{\text{с}}$	$\sigma_k^{\text{ср}}, \frac{\text{торр}}{\text{с}}$	$k_{\text{ср}} \cdot 10^6, \frac{\text{торр}}{\text{с}}$	$Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}, \text{торр} \cdot \frac{\text{л}}{\text{с}}$	$\sigma_{Q_{\text{д}}+Q_{\text{и}}}, \text{торр} \cdot \frac{\text{л}}{\text{с}}$
5.2	0.04	0.35	9.8	$5.55 \cdot 10^{-6}$	$0.4 \cdot 10^{-6}$
5.9	0.02	0.35			

Таблица 2: Коэффициенты наклона при ухудшении вакуума

Используя формулу $Q_{\text{н}} = P_{\text{пр}}W - (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}})$, а значит $\sigma_{Q_{\text{н}}} = \sqrt{\sigma_{P_{\text{пр}}W}^2 + \sigma_{Q_{\text{д}}+Q_{\text{и}}}^2} \approx 10^{-6} \text{ торр} \cdot \frac{\text{л}}{\text{с}}$, получим, что: $Q_{\text{н}} = (5.26 \pm 1) \cdot 10^{-6} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$.

13. Оценим пропускную способность трубки по формуле (2):

$$L = (10.8 \pm 0.1) \text{ см}; \quad d = (0.8 \pm 0.1) \text{ см},$$

$$C_{\text{тр}} = (0.58 \pm 0.2) \text{ л/с}.$$

Погрешность $C_{\text{тр}}$ оценена как корень из суммы квадратов погрешностей длины и диаметра (которые явным образом не указаны на установке, оценка довольно грубая).

14. Введем в систему искусственную течь и запишем значение установившегося при этом давления и давления $P_{\text{фв}}$:

$$P_{\text{уст}} = (6.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ торр}.$$

$$P_{\text{фв}} = (1 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ торр}.$$

15. Поскольку

$$P_{\text{пр}}W = Q_1, \quad P_{\text{уст}}W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt},$$

то с учетом (2), получаем:

$$W = \frac{P_{\text{фв}}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \approx 0.21 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

$$\sigma_W \approx 3W \frac{\sigma_d}{d} = 0.06 \frac{\text{л}}{\text{с}}, \quad W = (0.21 \pm 0.06) \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

(Поскольку погрешность d была оценена очень грубо, то и погрешность итогового значения можно взять такой же по относительной величине)

Полученное значение удивительно хорошо совпадает с предложенным ранее значением, что говорит о том, что предложенная модель течи работает.

16. Следуя указаниям выключаем установку.

5 Вывод

В ходе работы были проверены предложенные в теоретической части зависимости. Все из них были подтверждены, но, как было описано в ходе работы, предложенная модель диффузионного насоса работает не при всех давлениях

6 Приложение

		Ухудшение		Откачка		Откачка		Ухудшение
№	t, c	$P, \text{торр} \cdot 10^{-5}$	t, c	$P, \text{торр} \cdot 10^{-5}$	t, c	$P, \text{торр} \cdot 10^{-5}$	t, c	$P, \text{торр} \cdot 10^{-4}$
1	4	5.1	3	61	0	17	5	1.6
2	5	5.8	4	58	2	13	8	1.8
3	6	6.3	5	55	4	10	12	2.0
4	7	6.8	7	41	6	8.0	16	2.3
5	8	7.3	8	31	8	7.2	22	2.6
6	9	7.7	9	26	10	6.3	26	2.9
7	10	8.2	10	22	12	5.9	32	3.2
8	11	8.9	11	18	14	5.5	37	3.5
9	12	9.2	12	16	15	5.4	41	3.8
10	13	10	13	14	17	5.2	46	4.1
11	14	11	14	12	21	5.0	51	4.4
12	20	13	15	11	29	4.8	56	4.7
13	30	18	16	9.4	48	4.6	61	5.0
14	40	23	17	8.6	1	15	67	5.3
15	50	28	18	7.9	5	9.2	73	5.6
16	60	33	19	7.3	6	8.4	77	5.9
17	70	39	20	6.8	7	7.7	83	6.2
18	80	44	21	6.3	9	6.8	88	6.5
19	90	50	22	6.0	13	5.7	93	6.8
20	100	56	23	5.8			99	7.1
21			25	5.5			103	7.4
22			30	5.1				
23			35	4.8				
24			40	4.7				