

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОГО ТРУБОПРОВОДА СКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА И ОЦЕНКА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE VACUUM PIPELINE PUMPING SYSTEM OF HIGH-SPEED TRANSPORT AND ESTIMATION OF POWER CONSUMPTION

Д.А.Калинкин, dakalinkin@yandex.ru

О.В.Белова, ovbelova@yandex.ru

С.Б.Нестеров

С.В.Горюнов, svg777r@mail.ru

М.Д.Вульф

МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва

Рассмотрены основные параметры системы откачки вакуумного трубопровода для скоростного поезда. Разработана математическая модель системы откачки вакуумного трубопровода скоростного транспорта, проведена оценка потребляемой мощности, влияния периодов непрерывной работы вакуумной системы откачки, её размеров и материала трубопровода на параметры откачки. Проанализирована возможность создания системы откачки на базе современного оборудования.

The main parameters of the vacuum pipeline pumping system for a high-speed train are considered. A mathematical model of the vacuum pipeline pumping system of high-speed transport was developed, the power consumption, the influence of the periods of continuous operation of the vacuum pumping system, its dimensions and pipeline material on the pumping parameters were estimated. The possibility of creating a pumping system based on modern equipment is analyzed.

Ключевые слова: вакуумный трубопровод, скоростной транспорт, математическая модель, поток натеканий, время откачки.

Key words: vacuum pipeline, high-speed transport, mathematical model, leakage flow, pumping time.

Вакуумный скоростной транспорт – сверхскоростной вид транспорта, транспортный путепровод которого помещен в герметичный вакуумный трубопровод [1,2,8].

Преимуществами вакуумного поезда являются высокая скорость (500...1500 км/ч) и низкие энергозатраты на перемещение, недостатком – высокая стоимость инфраструктуры [8, 9,10,11].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим вакуумный трубопровод, в котором размещена система путепровода для высокоскоростных поездов, на примере одной из наиболее загруженных магистралей Москва–Санкт-Петербург длиной $L = 600$ км при различных диаметрах трубопровода $D = 2...5$ м [2,11,12,13]. Расчетная схема вакуумного трубопровода представлена на рис.1. Через равные расстояния l размещено N одинаковых вакуумных насосов или откачных агрегатов $N_1, N_2...N_N$ быстротой действия S_H каждый. Вакуумные насосы соединены с магистральным трубопроводом цилиндрическими трубопроводами диаметром d_0 и длиной l_0 , включающими вакуумные затворы $V_1, V_2...V_N$. Поступающая в магистраль

трубопровод газовая нагрузка от натеканий и газовыделений q равномерно распределена по его длине. С целью снижения сопротивления в 500...1000 раз [9] диапазон рабочих давлений выбран от $p_{MAX} = 5,0 \cdot 10^2$ Па до $p_{MIN} = 10^2$ Па, средняя скорость поезда $v = 600$ км/ч [2,3], максимальная – 1200 км/ч [13,15]. Определить зависимость изменения давления по длине трубопровода от времени его откачки.

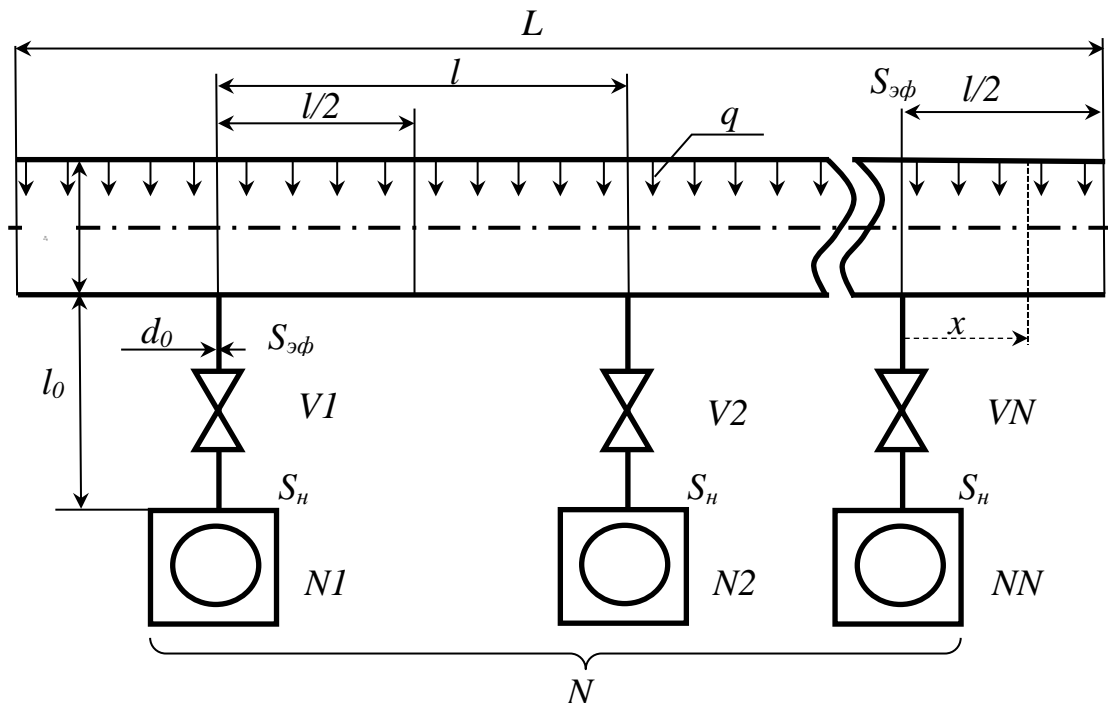


Рис.1. Расчётная схема вакуумного путепровода.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Условие квазистационарности откачки участка трубопровода может быть записано через соотношение временных постоянных откачки [5]

$$\frac{\tau_{\text{тр}}}{\tau_0} = \frac{V_{\text{тр}} \cdot U_0}{V_0 \cdot S_{\text{эф}}} \gg 1 \quad (1)$$

где $\tau_{\text{тр}} = V_{\text{тр}}/S_{\text{эф}}$, $V_{\text{тр}}$ – объем участка откачиваемого магистрального трубопровода между насосами, например, N1 и N2, $S_{\text{эф}}$ – эффективная быстрота откачки этого объема, $\tau_0 = V_0/U_0$, V_0 и U_0 – объем и проводимость трубопровода, соединяющего магистральный трубопровод с откачивающим насосом, например с N1 (см. рис. 1)

После подстановки в (1) геометрических размеров с учетом

$$S_{\text{эф}} = \frac{S_{\text{н}} \cdot U_0}{S_{\text{н}} + U_0} \quad (2)$$

имеем

$$\frac{\tau_{\text{тр}}}{\tau_0} = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \frac{l}{l_0} \cdot \frac{1}{\left(\frac{S_{\text{н}}}{U_0} + 1\right)} \gg 1 \quad (3)$$

Для эффективного использования вакуумного откачного оборудования принимаем $\frac{S_{\text{н}}}{U_0} \leq 1$, $l_0 = 1 \dots 5 \cdot d$. Диаметры входного патрубка выпускаемых вакуумных насосов находятся в диапазоне $d = 0,5 \dots 1,0$ м [5], что соответствует условию $3 \leq \left(\frac{D}{d}\right) \leq 10$. В этом случае $\frac{1}{\left(\frac{S_{\text{н}}}{U_0} + 1\right)} \leq \frac{1}{2}$. При $l_0 = d$, что соответствует наибольшей проводимости U_0 , получим оценку параметров (3), при которых можно рассматривать режим откачки как квазистационарный

$$\frac{\tau_{\text{тр}}}{\tau_0} = \left(\frac{D}{d}\right)^3 \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{1}{2} \gg 1 \quad (4)$$

Условие (4) выполняется с погрешностью не более 5% уже при $\frac{l}{D} > 3$, что соответствует конструкции рассматриваемой протяженной вакуумной системы.

Рассмотрим последовательные процессы откачки объема магистрального трубопровода, заключенного между двумя соседними насосами, и распределение давления по длине магистрального трубопровода между средствами откачки.

Пусть p - среднее давление по объему магистрального трубопровода, ограниченного сечениями на расстоянии $\pm l/2$ от места подсоединения патрубка диаметром d откачивающего насоса, например N1 (см. рис.1). Для этого объема запишем уравнение стационарной откачки

$$V_{\text{тр}} \frac{dp(\tau)}{d\tau} = Q_{\text{нат}\Sigma} - p \cdot S_{\text{эф}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{нат}\Sigma}$ - суммарный поток натекания и газовыделений.

Допустим, что система откачки поддерживает давление в заданном диапазоне независимо от движения поезда. Суммарный поток натеканий газа в трубопровод от поезда, путепровода и негерметичности трубопровода постоянен во времени, а его величина в 10^2 раз превышает поток газовыделений со стенок трубопровода. В таком случае суммарный поток натекания и газовыделений q больше потока газовыделений $Q_{\text{ГВ}}$ в трубопроводе

$$Q_{\text{нат}\Sigma} = q \cdot F = 101 \cdot Q_{\text{ГВ}}, \quad (6)$$

$$Q_{\text{ГВ}} = q_{\text{ГВ}} \cdot F$$

где $q_{\text{ГВ}}$ – удельный поток газовыделений материала поверхности трубопровода, F – площадь поверхности трубопровода.

Рассмотрим откачку с быстрой действия $S_{\text{эф}}/2$ участка магистрального трубопровода, расположенного на расстоянии $L_{\text{тр}}=l/2$ от насоса, например NN (рис.1), в сторону увеличения координаты x . Дифференциальное уравнение стационарной откачки имеет вид [19]

$$U_{\text{тр}} L_{\text{тр}} \frac{dp(x)}{dx} = q(L_{\text{тр}} - x) \cdot \Pi, \quad (7)$$

где $U_{\text{тр}}$ – проводимость участка трубопровода длиной $L_{\text{тр}}$ и периметром сечения Π ; в вязкостном режиме течения газа в круглом $\Pi = \pi \cdot D$ трубопроводе [5]

$$U_{\text{тр}} L_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot D^4}{\eta} (p_1 + p_2), \quad (8)$$

где p_1, p_2 – минимальное давления газа в сечении $x=0$ магистрального трубопровода диаметром D (сечение, в котором подсоединяется патрубок откачки диаметром $d \times l_0$ от вакуумного насоса NN) и максимальное давление газа в сечении $x=L_{\text{тр}}$.

Среднее давление \bar{p} по объему трубопровода, ограниченного сечениями на расстоянии $\pm l/2$ от места подсоединения патрубка диаметром d откачивающего насоса NN (см. рис.1)

$$\bar{p} = 2 \frac{1}{l} \int_0^{l/2} p(x) dx \quad (9)$$

В соответствии с введенными обозначениями в уравнении (5) получаем

$$p(\tau) = \bar{p} \quad (10)$$

Таким образом, искомой зависимостью давления от времени откачки по длине магистрального трубопровода, схематично представленного на рис.1, в вязкостном режиме течения газа, является совместное решение уравнений (2),(5),(6),(7),(8),(9),(10) которые представляют математическую модель процессов откачки при ограничениях (1), (3), (4), в виде

$$p(x, \tau) = \frac{1}{\bar{p}} \cdot p(x) \cdot p(\tau) \quad (11)$$

$p(\tau)$ получим в результате решения уравнения (5) в виде

$$p(\tau) = p_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{S_{\text{эф}}}{V_{\text{тр}}} \tau} + \frac{Q_{\text{нат}\Sigma}}{S_{\text{эф}}} \cdot (1 - e^{-\frac{S_{\text{эф}}}{V_{\text{тр}}} \tau}) \quad , \quad (12)$$

где первое слагаемое соответствует снижению среднего по объему $V_{\text{тр}}$ давления газа $p(\tau)$ от начального $p_{\text{нач}}$ за счет откачки насосом с эффективной быстротой $S_{\text{эф}}$, а второе – повышению давления за счет натекания в откачиваемый объем суммарного потока $Q_{\text{нат}\Sigma}$ натеканий и газовыделений.

$p(x)$ получим в результате решения уравнения (7) в виде

$$p(x) = \left[p_1^2 + \frac{2 \cdot q \cdot \Pi}{U_{\text{тр}} L_{\text{тр}}} \cdot (L_{\text{тр}} \cdot x - \frac{x^2}{2}) \right]^{1/2} \quad , \quad (13)$$

Изменение давления по длине магистрального трубопровода представлено на рис.2

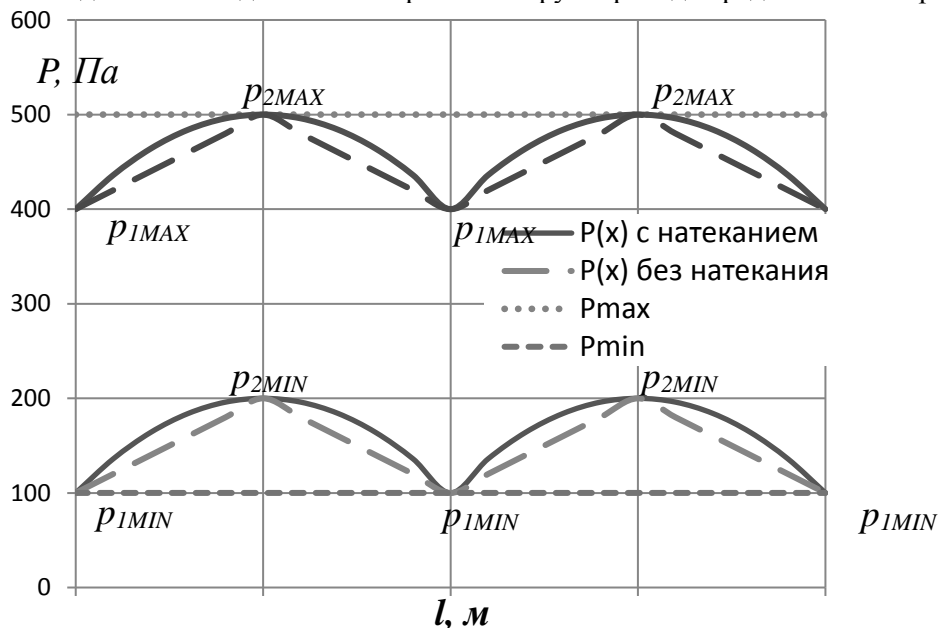


Рис.2. Изменение давления по длине магистрального трубопровода.

Распределение давления по длине трубопровода в стационарном режиме [5], представленное на рис.2, будет периодическим. Минимальное давление p_1 устанавливается в местах подсоединения каждого из N насосов, максимальное давление p_2 – на равном удалении $l/2$ от насосов, пунктирные линии показывают изменение давления без натеканий, сплошные - с учетом натеканий.

Диаграмма изменения давления P в вакуумном трубопроводе от времени τ при откачке от атмосферного давления до минимального рабочего давления и поддержании его в рабочем диапазоне $P_{\text{min}} < P \ll P_{\text{max}}$ представлена на рис.3

Для откачки трубопровода рассмотрены различные модели насосов отечественных и зарубежных производителей [5,6,7,8,11]. Большинство средств откачки в диапазоне давлений 100...500 Па имеют быстроту действия меньше $5,0 \text{ м}^3/\text{с}$ [5, 6,7,8, 11]. Для определения количества насосов использовались данные каталогов производителей насосов. Проведен выбор откачных средств по критерию минимума энергии, затрачиваемой на откачку трубопровода насосами за год. Лучшая энергоэффективность откачки существующим оборудованием составляет $S/W = 4,54 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Вт})$, где W – мощность, потребляемая вакуумным насосом, Вт [5,11].

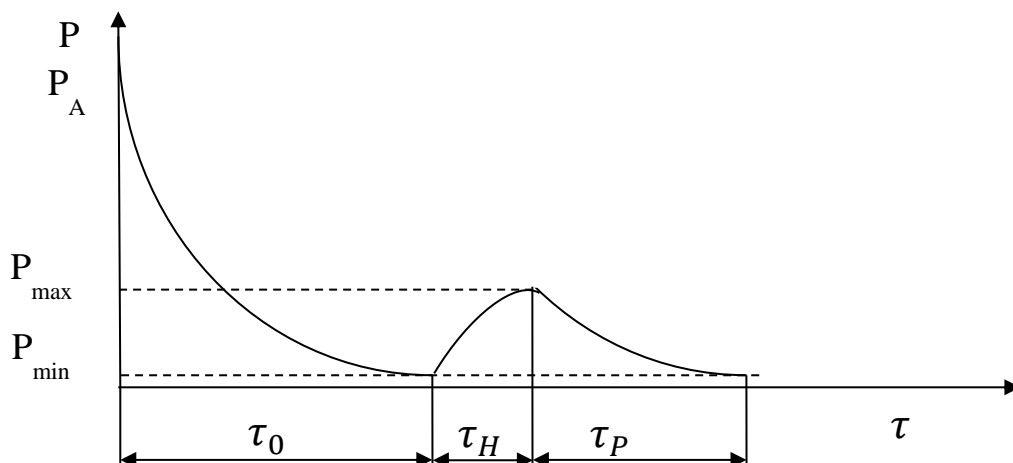


Рис.3 Зависимость среднего давления в вакуумном трубопроводе от времени. τ_0 - время откачки трубопровода от атмосферного P_A до минимального рабочего давления P_{min} ; τ_H – время, в течение которого откачка не проводится, давление в трубопроводе растет за счет натеканий; τ_P – время откачки в рабочем диапазоне давлений $P_{min} < P \ll P_{max}$.

ОЦЕНКА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

Проведем оценку времени откачки вакуумного трубопровода до минимального давления из выбранного диапазона.

Каждый насос откачивает ближайший к нему объем трубопровода $V_{тр}$ в соответствии с (12) от давления p_{2max} до p_{1min} за время

$$\tau = \frac{q_{гв} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L}{4 \cdot N \cdot S_{эф}} \cdot \ln \left(\frac{p_{2max} - \frac{Q_{нат\Sigma}}{S_{эф}}}{p_{1min} - \frac{Q_{нат\Sigma}}{S_{эф}}} \right), \quad (14)$$

где $l=L/N$ – длина вакуумного трубопровода между откачными постами (насосами), $S_{эф}$ – эффективная быстрота откачки одним насосом, N – количество насосов, $Q_{нат\Sigma}$ – суммарный поток натеканий с учётом удельного потока газовыделений $q_{гв}$ [5].

Зависимость времени откачки τ_0 трубопровода от атмосферного до минимального рабочего давления $P_1 = 100 \text{ Па}$ с учетом потока натеканий от необходимого количества насосов представлена на рис. 4.

Ожидаемое время простоя насосов – время, за которое давление в трубопроводе увеличится с p_1 до p_2 за счёт натекания газа в систему без откачки, можно оценить по зависимости

$$\tau_H = \frac{(P_2 - P_1) \cdot V}{Q_{нат\Sigma}} \quad (15)$$

где $Q_{нат\Sigma}$ – суммарный поток натекания в систему, с учётом технологического потока от системы поддержки движения и потока газовыделений $q_{гв}$.

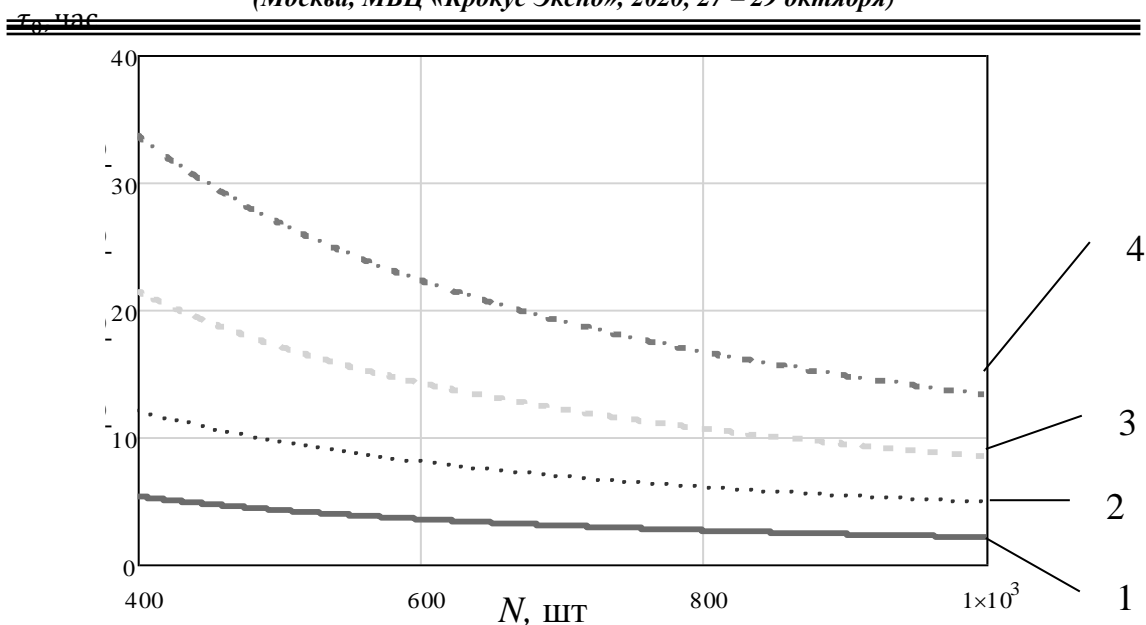


Рис.4 Зависимость времени τ_0 , час, откачки трубопровода от количества насосов N производительностью $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ с учетом протечек и газовыделений. Откачка проводится с атмосферы до рабочего давления $P_l = 100 \text{ Па}$ при различных диаметрах трубопровода: 1- $D=2,0 \text{ м}$; 2 – $D=3,0 \text{ м}$; 3- $D=4,0 \text{ м}$; 4- $D=5,0 \text{ м}$.

Зависимость времени τ_p откачки трубопровода в рабочем диапазоне давлений от количества насосов производительностью, например, $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ представлен на рис.5.

Видно, что для трубопровода диаметром, равным диаметру тоннеля метрополитена $D=5 \text{ м}$ [12] для откачки 600 насосами рабочее время $\tau_p = 18 \text{ час}$ (поз. 5, рис. 5) и время, в течение которого насосы отключены $\tau_H = 8 \text{ час}$ (поз. 4, рис. 5) сопоставимы между собой $\tau_p \sim \tau_H$. Поэтому возможна периодическая работа системы откачки.

Рассмотрены удельные потоки газовыделений [5] из вакуумных конструкционных материалов для внутренней поверхности трубопровода от максимального - у полимеров и фторопласта-4, до минимального - у низкоуглеродистой и коррозионностойкой сталей. В результате получено, что для откачки трубопровода диаметром от 3 до 4 м, изготовленного из коррозионностойкой стали, необходимое количество одинаковых энергоэффективных, например, ротационно-пластинчатых, насосов составит 500 ... 650 штук, из низкоуглеродистой стали – на 7-9% больше, а для трубопровода изготовленного из фторопласта-4 или покрытого им – насосов на 10-12% больше. Для подводных магистралей [15] дополнительная береговая форвакуумная откачка может быть проведена высокопроизводительными (до $0,55 \text{ м}^3/\text{с}$) воздуходувками, например вихревыми вакуум-компрессорами типа ВВК [16] или молекулярно-вязкостными вакуумными насосами [18].

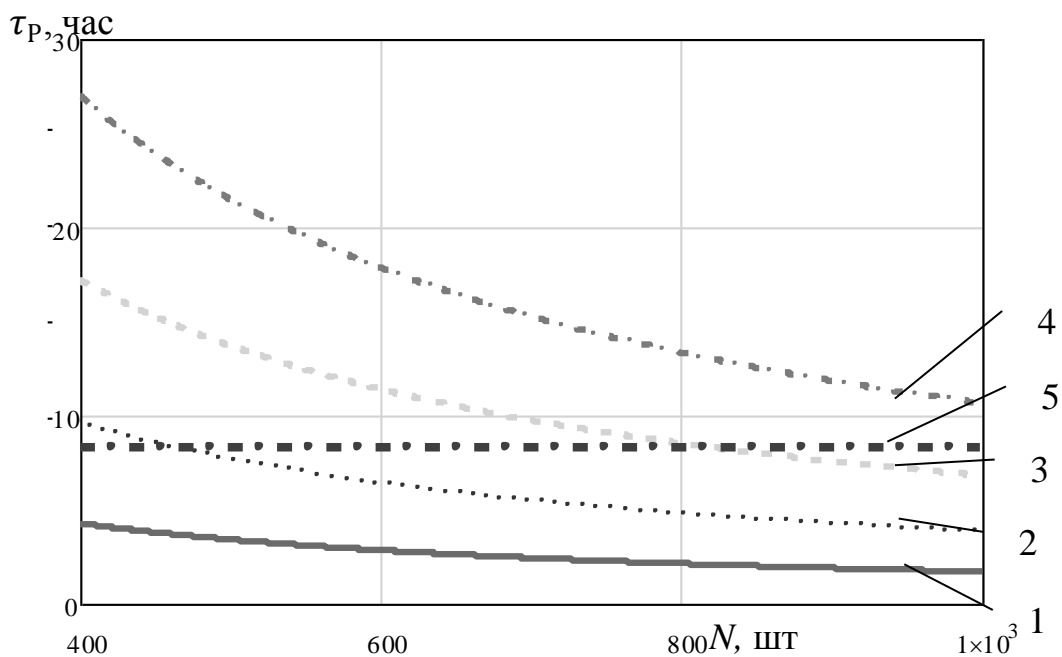


Рис.5 Зависимость времени τ_p , час, откачки трубопровода от количества N насосов производительностью $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ с учетом протечек и газовыделений. Откачка проводится от максимального $P_{2MAX} = 500 \text{ Па}$ до минимального рабочего давления $P_{1MIN} = 100 \text{ Па}$ при различных диаметрах трубопровода: 1- $D=2,0 \text{ м}$; 2 – $D=3,0 \text{ м}$; 3- $D=4,0 \text{ м}$; 4- $D=5,0 \text{ м}$; 5 - время τ_H простоя насосов.

Зависимость удельной мощности, потребляемой системой откачки, от диаметра трубопровода из различных материалов представлена на рис.6. В литературе [9,11,13,17] рассматриваются диаметры от 2 до 5 м.

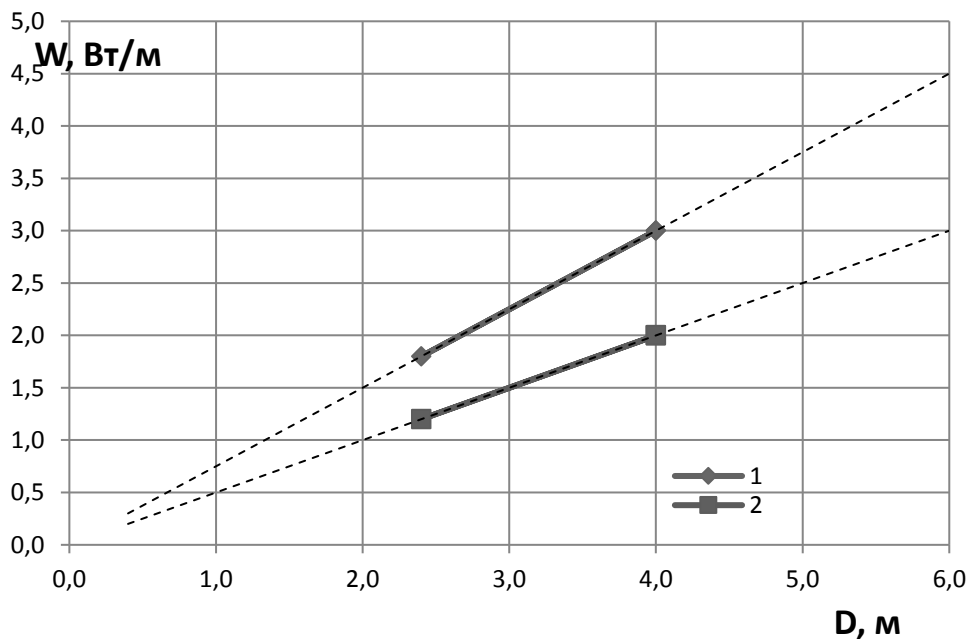


Рис.6 Зависимость удельной мощности W , Вт/м, потребляемой системой откачки, от диаметра трубопровода D , м, и его материала: 1 – полимер, фторопласт; 2 – сталь коррозионно-стойкая.

Видно, что при диаметре вакуумного трубопровода 3,0 м мощность, потребляемая системой вакуумной откачки, будет находиться в диапазоне от 2 до 3 МВт (1,2...360 Вт/м), а при увеличении диаметра до 4,0 м потребляемая мощность возрастет на 25...30%.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель распределенной системы вакуумной откачки трубопровода скоростного вакуумного трубопроводного транспорта в режиме работы, не зависящем от графика движения скоростных поездов. Давление в вакуумной системе поддерживается в диапазоне 100...500 Па, что обеспечивает минимальное сопротивление воздуха поезду, движущемуся со скоростью до 1200 км/ч.

2. С целью снижения потребляемой мощности возможно периодическое отключение вакуумных насосов на время, сопоставимое со временем их работы, без потери работоспособности вакуумной системы.

3. При использовании энергоэффективных насосов удельная потребляемая мощность системы вакуумной откачки трубопровода длиной 600 км с диаметрами 2,0...4,0 м зависит от материала трубопровода и, для традиционных конструктивных вакуумных материалов, находится в пределах от 1,0 Вт/м для коррозионностойкой стали до 3,0 Вт/м для полимерных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Форгач Р.Л. Скоростной вакуумный трубопроводный транспорт — конкурент реактивной авиации // Наземный транспорт 80-х годов. — М.: Мир, 1974.-С 121-137.

2. Фомин В.М., Наливайченко Д.Г., Терентьев Ю.А.. К вопросу выбора диапазона рабочих параметров вакуумного магнитолевитационного транспорта / Материалы XI Международной научно-технической конференции. Под ред. С.Б. Нестерова М.: НОВЕЛЛА. 2016. С. 273 – 283.

3. Фионов А.Н. Вакуумно-левитационный транспорт: перспектива или тупик? / Транспорт Российской Федерации, №3(70). 2017. С. 46-49.

4. BELOVA O.V., VULF M.D. PNEUMATIC CAPSULE TRANSPORT. /PROCEDIA ENGINEERING. V. 152. 2016. P. 276-280. DOI 10.1016/j.proeng.2016.07.703.

5. Вакуумная техника: Справочник // Под общ. ред. К.Е. Демикова, Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.

6. Oil-sealed rotary vane vacuum pumps. Режим доступа: <https://www.atlascopco.com/> (дата обращения: 06.05.2018).

7. SOGEVAC SV 630 B(F) - 750 B(F) Single-stage, oil-sealed Rotary Vane Vacuum Pumps. Режим доступа: <https://www.leybold.com> (дата обращения: 06.05.2018).

8. Пластинчато-роторные вакуумные насосы. Режим доступа: <https://vacma.ru/> (дата обращения: 06.05.2018).

9. Воробьев И.А., Кондратенко Р.О., Нестеров С.Б., Белоконев А.М. Высокоскоростной транспорт на основе магнитной левитации в разреженной среде / Материалы IX Международной научно-технической конференции. Под ред. С.Б. Нестерова М.: НОВЕЛЛА. 2014. С. 247 – 263.

10. Нестеров С.Б., Воробьев И.А., Кондратенко Р.О. Вакуумный поезд: поиск ниши на рынке перевозок пассажиров // Мир транспорта. Т.15, №3, 2017. С.112 – 121.

11. Воробьев И.А., Кондратенко Р.О., Нестеров С.Б., Белоконев А.М. Оценка характеристик вакуумной среды и энергетических параметров инфраструктуры для вакуумно-левитационного транспорта // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО "РЖД". Под ред. С.Б. Нестерова М.: №4. 2016. С. 18 – 24.

12. Руководство по сооружению перегонных тоннелей метрополитена. ТМ X-2-79/4. М. 1983. 52 с.

13. ZHANG Ya., OSTER D., KUMADA M., YU J., LI Sh., Key_vacuum_technology_issues_to_be_solved_in_evacu// Journal of Modern Transportation. Vol. 19, N. 2, 2011, P. 110-113
14. Kireev A.V., Kozhemyaka N.M., Kononov G.N. Potential Development of Vehicle Traction Levitation Systems with Magnetic Suspension. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 6, No. 1, March 2015, P. 26-31
15. Lapidus B. M. ON THE ESTABLISHMENT OF VACUUM-LEVITATION TRANSPORT SYSTEM. 2016. 13 p.
16. Сергеев В.Н. Воздуходувка ВВК-300. График давления и производительности ВВК-300. <https://bezmasla.ru/vozduhoduvka-vvk-300/>
17. OSTER D., KUMADA M., ZHANG Y. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm : a maximum value global transportation network for passengers and cargo // Journal of Modern Transportation. Vol. 19, Num. 1, March 2011, P. 42-50 DOI: 10.1007/BF03325739.
18. Svichkar E.V., Nikulin N.K., Klyucharov V.S., Demikhov K.E. Molecular-Viscous Vacuum Pump (MVVP) // Oil and Gas Engineering (OGE-2017). AIP Conf. Proc. 1876, 020058-1–020058-7; doi: 10.1063/1.4998878
19. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 2013, 320 с.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ THERMOPHYSICAL THEORY OF CRYOTHERAPEUTIC EFFECT

**А.В.Буторина¹, А.М.Архаров², С.Б.Нестеров², А.В.Пушкарев², А.В.Шакуров²,
Н.А.Андреев²**

A.V.Butorina, A.M.Arkharov, S.B.Nesterov, A.V.Pushkarev, A.V.Shakurov, N.A.Andreev

¹Российский национальный исследовательский медицинский университет им.
Н.И.Пирогова, г. Москва

²МГТУ им. Н.Э. Баумана. Г. Москва

Криотерапия оказывает интенсивное охлаждающее действие на кожный покров.

Cryotherapy has an intense cooling effect on the skin.

Ключевые слова: *криотерапия, криогенные газовые среды, ультра -низкие температуры, термический шок.*

Key words: *cryotherapy, cryogenic gas media, ultra low temperatures, thermal shock.*

Применение холода для утоления боли и купирования воспаления имеет достаточно древнюю историю. На сегодняшний день, понятие «криотерапия» включает совокупность физических методов лечения основанных на отведении тепла с помощью жидких, твердых и газообразных рабочих тел (от влажных холодных обтираний до воздействия сверхнизкими и ультранизкими температурами). Причем, охлаждающее воздействие возможно как на отдельные участки, так и на организм человека в целом.

Метод терапевтического воздействия с помощью криогенных газовых сред с температурами до минус 200°С, предложенный японским учёным J. Jatauchi в середине 70-х годов, открыл новое направление в разработке высокоэффективных криомедицинских