

УДК 621.34

**Т. С. Камалов**, д-р техн. наук,  
**О. Х. Ишназаров**, канд. техн. наук

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Аннотация.* Представлены аналитические выражения для расчета режимов работы частотно-регулируемого электропривода насосной установки откачки пульпы с учетом параметров насосного агрегата в функции питающего напряжения сети и нагрузки на валу.

*Ключевые слова:* насос, электропривод, частотное регулирование, математическая модель, режим работы

**T. Kamalov**, ScD.,  
**O. Ishnazarov**, PhD.

### ANALYTICAL RESEARCH OF ELECTRIC DRIVE OF TURBO MACHINERY OF THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

*Abstract.* The paper presents the analytical expressions for calculating modes pump unit pumping slurry within the parameters of the pump unit as a function of the supply voltage and the load on the shaft.

*Keywords:* pump, electric drive, frequency regulation, mathematical model, mode of operation

**T. S. Kamalov**, д-р техн. наук,  
**О. Х. Ишназаров**, канд. техн. наук

### АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНІЗМІВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Анотація.* Представлені аналітичні вирази для розрахунку режимів роботи частотно-регульованого електропривода помпової установки відкачування пульпи з врахуванням параметрів помпового агрегату в функції напруги живлячої мережі та навантаження на валу.

*Ключові слова:* помпа, електропривод, частотне регулювання, математична модель, режим роботи

**Введение.** Важной задачей для предприятий горно-металлургической промышленности является обеспечение энергосбережения, что соответствует Постановлению Кабинета Министров Республики Узбекистан от 8 января 2014 года № 5 «О дополнительных мерах по сокращению производственных затрат и снижению себестоимости продукции в промышленности». С этой целью в последнее время на предприятиях горно-металлургической промышленности широкое распространение получили современные системы автоматизации технологических процессов на основе частотно-регулируемого электропривода, особенно для турбомеханизмов (вентиляторы, насосы и компрессоры), которые объединяются в один класс производственных механизмов [1].

Как показали наши исследования, насосные установки откачки пульпы являются связующим звеном технологического процесса переработки руды и одним из наиболее массовых и энергоемких систем турбомеха-

низмов горно-металлургической промышленности. Наиболее распространёнными являются насосы 5Гр-8, 8Гр-8 и 12Гр-8, с мощностями 40, 110 (132) и 355 кВт соответственно.

Практика эксплуатации показывает, что в большинстве случаев электроприводы технологических установок насосов откачки пульпы являются нерегулируемыми, а регулирование производительности при этом осуществляется включением и отключением насоса.

На рис. 1 приведена схема насосной установки откачки пульпы с переменным статическим напором. На рис. 2 представлен график совместной работы зумпфа, насоса и пульпопровода с переменным статическим напором.

В циклическом режиме работы (рисунках 1 и 2) [2] при включении в работу насоса статический напор равен  $H_{n1}$ , а при отключении, соответственно, становится равным  $H_{n2}$ . Изменение статического напора определяется разностью отметок уровня включения (УВ) и уровня отключения (УО) насоса. По этой причине характеристика пульпопровода

© Камалов Т. С., Ишназаров О.Х., 2015

в начальный период откачки занимает положение 1, а в конце – положение 2 (рис. 2). При этом рабочая точка насоса, работающего с постоянной частотой вращения, перемещается по напорной характеристике насоса от точки *a* до точки *б*, т. е. насос работает с переменным напором от  $H_a$  до  $H_b$ .

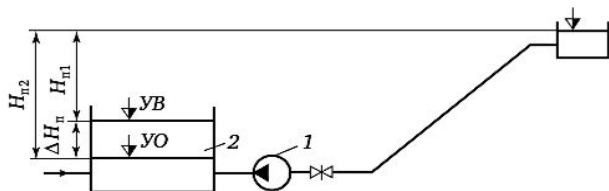


Рис. 1. Схема насосной установки откачки пульпы с переменным статическим напором:  
УВ – уровень включения насоса;  
УО – уровень отключения насоса;  
1 – насос; 2 – зумпф

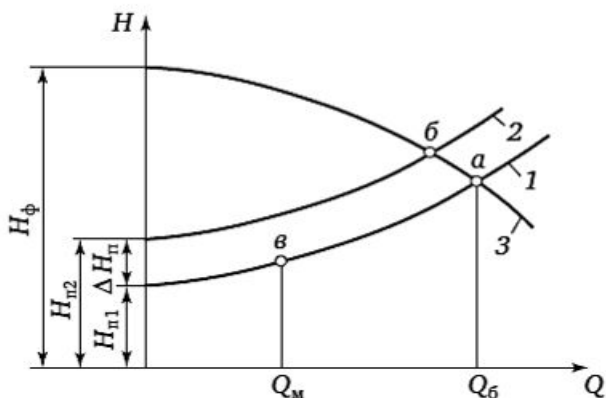


Рис. 2. График совместной работы зумпфа, насоса и пульпопровода с переменным статическим напором:  
1 – характеристика пульпопровода при включении насоса в работу;  
2 – то же при отключении насоса;  
3 – характеристика насоса

Откачка пульпы с более высокого уровня требует меньших затрат электроэнергии, чем с нижнего [1 – 3]. В этом случае создается более экономичный режим работы насосной установки. Такой режим может быть обеспечен регулированием частоты вращения насоса. При этом рабочая точка насоса перемещается по характеристике пульпопровода от точки *a* до точки *в* (рис. 2), т. е. насос работает с переменным напором от  $H_a$  до  $H_b$ .

Как показали наши исследования, а также исследования авторов [1; 3 – 7], частотно-регулируемый электропривод является са-

мым экономичным способом регулирования производительности насосов. В соответствии с этим ниже рассмотрим режим работы насосной установки откачки пульпы с нерегулируемым и частотно-регулируемым электроприводом.

Реальные характеристики насосного агрегата могут быть получены только при совместном рассмотрении характеристик насоса и напорного трубопровода [3; 8]. В связи с этим нами разработана математическая модель функционирования системы «асинхронный двигатель – насос – напорный пульпопровод».

Основной характеристикой насоса является его расходно-напорная характеристика, т.е. зависимость напора от расхода. С достаточной точностью в пределах рабочей зоны эта характеристика может быть представлена параболой [1; 8]

$$H = H_0 \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - A Q^2, \quad (1)$$

где  $A = (H_0 - H_n) / Q_n^2$ ;  $H$  – полный напор насоса, м;  $Q$  – производительность, м<sup>3</sup>/с;  $H_0$  – напор при  $Q=0$  и  $\omega=\omega_n$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения рабочего колеса, рад/с;  $H_n$ ,  $Q_n$ ,  $\omega_n$  – их номинальные значения.

Характеристику напорного пульпопровода можно описать следующим выражением [2]:

$$H = H_{cm} + R Q^2; \quad (2)$$

здесь  $H_{cm}$  – статический напор (м);  $R$  – коэффициент сопротивления напорного пульпопровода. Согласно [9] для прямого участка пульпопровода  $R = 0,083 \lambda L / d^5$  и для местных сопротивлений  $R = 0,083 \xi / d^4$ :

здесь  $\lambda = 0,04 \div 0,05$  – коэффициент трения пульпы о стенки пульпопровода;  $L$  – длина пульпопровода, м;  $d$  – диаметр пульпопровода, м;  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления, равный для задвижек  $\xi = 0,5$ , для закругленного на 90° колена  $\xi = 0,3$ , для обратного клапана  $\xi = 5,0$ .

Выражения (1) и (2) определяют рабочий режим насосного агрегата. Решая их совместно относительно производительности, получим

$$Q = \frac{\sqrt{(A+R) \left( H_0 \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - H_{cm} \right)}}{A+R}. \quad (3)$$

Используя (3), можно определить мощность на валу насоса, работающего на напорный пульпопровод,

$$N_{мех} = N_0 \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^3 + B \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 Q, \quad (4)$$

где  $B = (N_{мех.н} - N_0) / Q_n$ ;  $N_0$  – мощность на валу при  $Q=0$  и  $\omega = \omega_n$ ;  $N_{мех.н}$  – номинальное значение мощности на валу.

Полезная мощность насоса определяется формулой

$$N = \frac{\rho H Q}{102}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность пульпы, значение которой принимают  $1200 \div 1400$  кг/м<sup>3</sup> (плотность меняется в зависимости от состава и твердости добываемой руды).

Отношение полезной мощности (5) к мощности на валу (4) дает КПД насоса, работающего на напорный пульпопровод,

$$\eta_N = N / N_{мех}. \quad (6)$$

Разделив обе части (4) на угловую частоту вращения рабочего колеса  $\omega$ , получим момент сопротивления на валу насосного агрегата

$$M_c = M_0 \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + (M_n - M_0) \frac{\omega}{\omega_n} Q. \quad (7)$$

Выражения для потребляемой, электромагнитной мощности и мощности на валу двигателя имеют следующий вид:

$$P_1 = \left( \frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{m U_n^2}{D^2} \left\{ r_1 \left[ \left( \frac{r_2}{\beta} \right)^2 + x_r^2 + \frac{r_2'}{\beta} x_{\mu n}^2 F \right] \right\}, \quad (8)$$

$$P_3 = \left( \frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{m U_n^2 r_2' x_{\mu n}^2 F}{\beta D^2}, \quad (9)$$

$$P_2 = \left( \frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{m U_n^2 r_2' x_{\mu n}^2}{\beta D^2} (F - s), \quad (10)$$

$$\text{где } D = \sqrt{\left( \frac{r_1 r_2'}{F \beta} - x_s x_r \sigma \right)^2 + \left( \frac{r_2'}{\beta} x_s + \frac{r_1}{\beta} x_{\mu n} \right)^2},$$

$a = mp / 19,62 f_n \pi$ , а  $p$  и  $m$  – число пар полюсов двигателя и число фаз статора;  $K_u = U / U_n$  – относительное напряжение;  $F = f / f_n$  – относительная частота;  $x_s = x_{1n} + x_{\mu n}$ ,  $x_r = x_{2n} + x_{\mu n}$ ,  $\sigma = 1 - x_{\mu n}^2 / x_s x_r$ ,  $r_1$  и  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивление обмотки статора;  $r_2'$  и  $x_2'$  – приведенные активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора;  $x_{\mu n}$  – индуктивное сопротивление намагничивающей цепи двигателя,  $s$  – скольжение двигателя;  $\beta = Fs$  – абсолютное скольжение.

Электромагнитный момент двигателя

$$M_3 = \frac{2M_{\text{эк}}(1 + q\beta_{\kappa})}{\frac{\beta}{\beta_{\kappa}} + \frac{\beta_{\kappa}}{\beta} + 2q\beta_{\kappa}}, \quad (11)$$

где

$$M_{\text{эк}} = \left( \frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{a U_n^2 x_{\mu n}^2 / 2}{x_r \sqrt{\left[ \left( \frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2 \right] \left[ \left( \frac{r_1}{F} \right)^2 + (x_s \sigma)^2 \right]} + \frac{r_1}{F} x_{\mu n}^2}$$

$$q = \frac{r_1 x_{\mu n}^2 / r_2' F}{\left( \frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2}, \quad \beta_{\kappa} = \frac{r_2'}{x_r} \sqrt{\frac{\left( \frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2}{\left( \frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2 \sigma^2}}$$

Из (8) и (10) определяется КПД двигателя

$$\eta_d = P_2 / P_1. \quad (12)$$

Найдем зависимости скольжения от питающего напряжения и момента нагрузки на валу с учетом полного уравнения механической характеристики двигателя (11). При этом учитываем, что в установившемся режиме  $M_3 = M_c$ , так как момент механических потерь весьма мал по сравнению с полезным вращающимся моментом, который равен моменту сопротивления на валу.

Разделив обе части (11) на номинальный электромагнитный момент, получим

$$\mu = \frac{2\lambda(1 + q\beta_{\kappa})}{2q\beta\beta_{\kappa}^2 + \beta^2 + \beta_{\kappa}^2}, \quad (13)$$

где  $\lambda = \frac{M_{эк}}{M_{эн}}, \mu = \frac{M_c}{M_{сн}} = \frac{M_{э}}{M_{эн}}$ .

Решив (13) относительно абсолютного скольжения, получим

$$\beta_{1,2} = \pm \frac{1}{\mu} \left[ \left( \lambda q \beta_k - \mu q \beta_k + \sqrt{\lambda^2 q^2 \beta_k^2 - 2\lambda \mu q^2 \beta_k^2 + \mu^2 q^2 \beta_k^2 + 2\lambda^2 q \beta_k - + \lambda} \right) \beta_k \right] \quad (14)$$

Так как  $\omega = \omega_n (F - \beta)$ , если считать  $\omega_n = \omega_0$ , то относительная скорость вращения определяется

$$\frac{\omega}{\omega_n} = F - \beta. \quad (15)$$

Выразим относительную скорость рабочего колеса насоса, входящую в (3) и (4), через относительную частоту и параметр абсолютного скольжения. Подставив (15) в (3) и выполнив некоторые преобразования, найдем производительность насоса в функции относительной частоты и параметра абсолютного скольжения

$$Q = \frac{\sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)}}{A+R}. \quad (16)$$

Из (5) и (16) полезная мощность насоса в функции относительной частоты и абсолютного скольжения

$$N = \frac{\rho H}{102} \frac{\sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)}}{A+R}. \quad (17)$$

Аналогично из (4) и (7) механическая мощность и момент сопротивления на валу насосного агрегата в функции относительной частоты и абсолютного скольжения

$$N_{мех} = \frac{1}{A+R} \left( (F-\beta)^2 (AFN_0 - AN_0\beta) + FN_0R - N_0R\beta + B\sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)} \right), \quad (18)$$

$$M_c = M_0 (F - \beta)^2 + \frac{1}{A+R} \left( (M_n - M_0)(F - \beta) \times \sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)} \right). \quad (19)$$

Отношение (17) к (18) дает КПД насоса в функции относительной частоты и абсолютного скольжения приводного двигателя

$$\eta_N = \frac{1}{102} \times \left( \rho H \sqrt{F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm}} (A+R) \right) / \left( (F-\beta)^2 (AFN_0 - AN_0\beta + FN_0R - N_0R\beta + B\sqrt{F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm}} (A+R)) \right). \quad (20)$$

КПД насосного агрегата в функции относительной частоты и абсолютного скольжения определяются с помощью (20) и (12)

$$\eta_{НА} = \eta_N \eta_\delta. \quad (21)$$

При выполнении указанных расчетов необходимо знать закон частотного управления и диапазон изменения частоты. Для обеспечения устойчивой работы электродвигателя, ограничения его перегрузки по току и магнитному потоку, поддержания высоких энергетических показателей в частотном преобразователе должно поддерживаться определенное соотношение между напряжением и частотой, зависящее от вида механической характеристики насоса. Как известно, закон частотного управления для насосов записывается следующим образом [2; 4; 10]:

$$K_U = F^2. \quad (22)$$

Диапазон регулирования частоты при рассматриваемых условиях определяется верхним значением, которое соответствует номинальной частоте сети  $f_n$ , и нижним её значением, которое зависит от технологических условий эксплуатации насосов

$$f_{\min} = f_n \sqrt{\frac{H_{cm \min}}{H_n}}, \quad (23)$$

где  $H_{cm \min}$  – минимально возможный напор насоса.

Таким образом, разработана математическая модель всего комплекса, включающего частотно-регулируемый электропривод и насос, позволяющая исследовать их как систему взаимосвязанных элементов. Данная модель позволяет исследовать режим работы агрегата и в частном случае, когда скорость двигателя не регулируется ( $F = 1$ ).

#### Список использованной литературы

1. Онищенко Г. Б. Электропривод турбомеханизмов / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юнков. – М. : Энергия, 1972. – 240 с.
2. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б. С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2013. – 176 с.

3. Камалов Т. С. Влияние параметров насоса, напорного трубопровода и питающей сети на энергетическую эффективность электропривода насоса / Т. С. Камалов, О. Х. Ишназаров, К. Муминов // Сборник статей республиканской научно-практической конференции. – Ташкент : – 2003. ТИИМ. – С. 100 – 105.

4. Камалов Т. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных станций систем машинного орошения / Т. С. Камалов. – Ташкент : Фан, 2014. – 368 с.

5. ООО «АББ». Анализ технических решений: устройства плавного пуска, частотно-регулируемый привод или параллельная схема управления центробежными насосами / Журнал «ИСУП». – М. : – 2011. – № 6 (36). – С. 43 – 50.

6. Ильинский Н. Ф. Электропривод: энерго – и ресурсосбережение / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 202 с.

7. Vasquez H., and Parker J., (2004), A new Simplified Mathematical Model for a Switched Reluctance Motor in a Variable Speed Pumping Application, *Mechatronics 14*, pp. 1055 – 1068.

8. Ghafouri J, Khayatzadeh F., and Khayatzadeh A., (2012), Dynamic Modeling of Variable Speed Centrifugal Pump Utilizing MATLAB / SIMULINK, *International Journal of Science and Engineering Investigation*, Vol. 1, Iss. 5, June 2012.

9. Копытов Ю. В. Экономия электроэнергии в промышленности. Справочник / Ю. В. Копытов, Б. А. Чуланов. – М. : Энергия, 1978. – 117 с.

10. Осташевский Н. А. Потери в частотно-управляемом асинхронном двигателе при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты / Н. А. Осташевский, **В. Н. Иваненко**, А. Н. Петренко // *Электротехника і електромеханіка*. – 2009. – № 3. – С. 37 – 41.

11. Дядюн С. В. Математическое моделирование систем водоснабжения совместно с активными источниками и регулирующими емкостями / С. В. Дядюн, О. Н. Штельма // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – № 4 (15). – Том 1. – С. 16 – 18.

12. Свистунов В. А. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода / В. А. Свистунов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки* – 2013. – № 12-2. – С. 135 – 140.

Получено 10.01.2015

## References

1. Onishchenko G.B., and Yunkov M.G., *Elektroprivod turbomekhanizmov* [Electric Drive of the Turbo Machinery], (1972), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 240 p. (In Russian).

2. Leznov B.S. *Chastotno-reguliruemyye elektroprivodnykh ustanovok*, [Variable Frequency Drive of Pump Installations], (2013), Moscow, Russian Federation, *Engineering*, 176 p. (In Russian).

3. Kamalov T.S., Ishnazarov O.Kh., and Muminov K. *Vliyaniye parametrov nasosa, napornogo truboprovoda i pitayushchey seti na energicheskuyu effektivnost' elektroprivodnogo nasosa*, [Influence of Pump, Pressure Pipe and Supply on the Energy Efficiency of the Electric Pump], (2003), *Collection of Articles of the Republican Scientific and Practical Conference*. Tashkent, Republic of Uzbekistan, *TIIM*, pp. 100 – 105 (In Russian).

4. Kamalov T.S. *Chastotno-reguliruemyye elektroprivodnykh stantsii sistem mashinnogo orosheniya*, [Variable Frequency Drive Pump Stations of Machine Irrigation Systems], (2014), Tashkent, Republic of Uzbekistan, *Fan*, 368 p. (In Russian).

5. ООО «АББ» *Analiz tekhnicheskikh reshenii: ustroystva pлавного пуска, chas-totno-reguliruemyye privodili parallel'nayashkema upravleniya sentrobezhnymi nasosami*, [Analysis of Technical Solutions: Soft Starters, Variable Frequency Drive or Parallel Circuit of the Centrifugal Pump], (2011), Moscow, Russian Federation, *Magazine "PMIS"*, No. 6 (36), pp. 43 – 50 (In Russian).

6. Il'inskiy N.F., and Moskalenko V.V. *Elektroprivod: energo – i resursosberezhenie*, [Electro Drive: Energy – and Resource Saving],

(2008), Moscow, Russian Federation, *Publishing Center "Academy"*, 202 p. (In Russian).

7. Vasquez H., and Parker J., (2004), A new Simplified Mathematical Model for a Switched Reluctance Motor in a Variable Speed Pumping Application, *Mechatronics 14*, pp 1055 – 1068.

8. Ghafouri J, Khayatzadeh F., and Khayatzadeh A., (2012), Dynamic Modeling of Variable Speed Centrifugal Pump Utilizing MATLAB / SIMULINK, *International Journal of Science and Engineering Investigations*, Vol. 1, Iss. 5, June 2012.

9. Kopitov J., and Chulanov B.A. *Ekonomiyaelektroenergii v promyshlennosti. Spravochnik [Energy Savings in the Industry. Dictionary]*, (1978), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 117 p. (In Russian).

10. Ostashevsky N.A., Ivanenko V.N., and Petrenko A.N., *Poteri v chastotno-upravlyаемomasinkhronnomdvigateleprirazlichnykhzakonakhregulirovaniyaitipakhpreobrazovatelei chastity*, [Loss in the Frequency-Controlled Induction Motor with Various Laws Regulating and Types of the Frequency Converters], (2009), *ElektrotehnikaiElektromehanika*. No. 3, pp. 37 – 41 (In Russian) (In Russian).

11. Dyadyun S.V., and Shtelma O.H. *Matematicheskomodelirovaniyesistemvodost-nabzheniyasovmestno s aktivnymiistochnikamiireguliruyushchimiemkostyami*, [Mathematical Modeling of Water Supply Systems in Conjunction with the Active Sources and Regulatory Capacities], (2014), *Technology Audit and Production Reserves*, No. 4 (15), Vol. 1, pp. 16 – 18 (In Russian).

12. Svistunov V.A. *Avtomatizatsiyanasosnoistantsii s primeneniemchastotnereguliruemogoelektroprivoda*, [Automation of Pump Stations with Variable Frequency Drive], (2013), *Bulletin of the Tula State University. TechnicalSciences*, No. 12-2, pp. 135 – 140 (InRussian).



Камалов  
ТоляганСиражиддинович,  
д-р тех. наук, проф., зав.  
лабораторий автоматизи-  
рованного электропрпри-  
водаИн-та энергетики и  
автоматики Академии наук  
Республики Узбекистан.  
Узбекистан, г. Ташкент,  
ул. Дурмонйули, 29.  
E-mail: tkamalov@yandex.ru



Ишназаров  
ОйбекХайриллаевич,  
канд. тех. наук, зам. дирек-  
тора по науке Ин-та энер-  
гетики и автоматики Ака-  
демии наук Республики  
Узбекистан.  
Узбекистан, г. Ташкент,  
ул. Дурмонйули, 29.  
E-mail: iozbek@gmail.com