

## Гидродинамические особенности осаждения частиц процесса декантации при рекуперации вторичных вод

Геннадий В. Калашников<sup>1</sup> kagen5@yandex.ru  
Иван М. Атисков<sup>1</sup> nagi.soichero@mail.ru

<sup>1</sup> кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия

**Реферат.** Водное хозяйство является важной составной частью в производственной сфере каждого свеклосахарного завода. Оно по своей сложности и удельному водопотреблению не имеет аналогов среди других пищевых предприятий. При производительности свеклосахарного завода по свекле 9 тыс. т в сутки требуется для мойки свеклы большой удельный расход воды и необходимо около 60 тыс. т воды. В связи с этим большое внимание уделяется очистке транспортерно-моющих вод, что позволяет ее повторно использовать для мойки свеклы, а также выполнять более качественную очистку вторичных вод. На основе изучения технологии очистки вторичных вод проведен анализ исследования процесса гравитационного осаждения частиц при стесненном движении. Осаждение твердых частиц в суспензии под действием сил тяжести и центробежных сил, механическое перемешивание в жидких средах связано с движением твердых тел в жидкостях. При движении тела в жидкости возникает сопротивление, которое зависит от режима движения и формы обтекаемого тела. В процессах осаждения взвешенная частица перемещается в жидкости под действием различных сил: силы тяжести и подъемной (архимедовой) силы, направленной в сторону, обратную направлению силы тяжести, а также силы движения самой среды (суспензии) за счет механического перемешивания. На основе моделирования гравитационного осаждения частиц при стесненном движении в процессе очистки вторичных вод свеклосахарного производства и предложенной методике расчета определена скорость осаждения частиц в зависимости от наличия дисперсной фазы и переменного числа Рейнольдса при различном диаметре осаждаемых частиц. Выполнен анализ механизма гравитационного осаждения при стесненном движении и приведены результаты расчета в виде графиков изменения функции отношения скоростей при стесненном и свободном движении от доли дисперсной фазы при различных значениях числа Рейнольдса, которые позволяют определить скорость осаждения для различного диаметра частиц. На основе изучения технологических процессов очистки промышленных вод и осаждения при стесненном движении твердых частиц в жидкости определены направления рекуперации вторичных вод и предложена машинно-аппаратурная схема линии очистки транспортерно-моющих вод свеклосахарного производства. Разработана схема участка мойки свеклы и рекуперации вторичных вод на ОАО «Елань-Коленовский сахарный завод», которая предусматривает высокую степень очистки транспортерно-моющих вод.

**Ключевые слова:** транспортерно-моющая вода, осаждение частиц, скорость стесненного движения, свекла

## Hydrodynamic properties of sedimentation particles of decantation process in recovery of secondary water

Gennadii V. Kalashnikov<sup>1</sup> kagen5@yandex.ru  
Ivan M. Atiskov<sup>1</sup> nagi.soichero@mail.ru

<sup>1</sup> machines and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

**Summary.** The water management is the important component in industrial sphere of everyone sugar beet a factory. It on the complexity and specific water consumption has no analogues among other food enterprises. At productivity sugar beet a factory on a beet 9 thousand t in day is required for a washing of a beet the big specific charge of water and it is necessary nearby 60 thousand t waters. In this connection the big attention is given clearing of transporter-washing waters that allows to use repeatedly her for a washing of a beet, and also to carry out better clearing secondary waters. On the basis of studying technology of clearing of secondary waters it is carried out the analysis of research of process of gravitational sedimentation of particles at the constrained movement. Sedimentation of firm particles in suspensions under action of gravities and centrifugal forces, mechanical hashing in liquid environments is connected with movement of firm bodies in liquids. At movement of a body in a liquid there is a resistance which depends on a mode of movement and the form of a streamline body. In processes of sedimentation the weighed particle moves to liquids under action of various forces: gravities and elevating (ascending) forces directed aside, return to a direction of a gravity, and also force of movement of the environment (suspension) due to mechanical hashing. On the basis of modeling gravitational sedimentation of particles at the constrained movement during clearing secondary waters sugar beet manufactures and the offered design procedure speed of sedimentation of particles depending on presence of a disperse phase and Reynolds's variable number is certain at various diameters of besieged particles. It is analysed the mechanism of gravitational sedimentation at the constrained movement and results of calculation in the form of schedules of change of function of the attitude of speeds are resulted at the constrained and summary movement from a share of a disperse phase at Reynolds's various values which allow to define speed of sedimentation for various diameter of particles. On the basis of studying technological processes of clearing of process waters and sedimentation at the constrained movement of firm particles in a liquid directions recuperation secondary waters are certain and the machine-hardware scheme of a line of clearing of transporter-washing waters sugar beet manufactures is offered. The scheme of a site of a washing of a beet and recuperation secondary waters on JCS "Elan-Kolenovskiy sugar factory" which provides a high degree of clearing of transporter-washing waters is developed.

**Keywords:** transporter-washing water, sedimentation of particles, speed of the constrained movement, beet

Для цитирования

Калашников Г. В., Атисков И. М. Гидродинамические особенности осаждения частиц процесса декантации при рекуперации вторичных вод // Вестник ВГУИТ. 2016. № 4. С. 22–26. doi:10.20914/2310-1202-2016-4-22-26

For citation

Kalashnikov G. V., Atiskov I. M. Hydrodynamic properties of sedimentation particles decantation process in secondary recovery water. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 4. pp. 22–26. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-4-22-26

### Введение

Для перерабатывающих производств агропромышленного комплекса важное значение имеет рекуперация отработанной воды, особенно в свеклосахарной отрасли, в которой только для мойки свеклы на одном предприятии при переработке 9 тыс. т свеклы затрачивается около 60 тыс. т воды в сутки. Актуальным является вопрос создания ресурсосберегающих технологий как при переработке сахарной свеклы, так и для других производств, связанных с переработкой пищевого растительного сырья в виде клубней и корнеплодов, а также охраны окружающей среды от сопутствующих загрязнений свеклосахарного производства, экономия расхода воды и ее очистка [1-2].

Известен обобщенный метод определения скорости стесненного движения сферических твердых и газовых частиц в жидкостях, базирующийся на вариационном принципе минимума интенсивности диссипации энергии [3].

Показано, что вариационный принцип минимума интенсивности диссипации энергии может с успехом использоваться для решения гидромеханических задач стесненного движения

фаз при всплывании микропузырьков, осаждении и псевдооживлении. Во всех случаях может быть учтено групповое движение частиц, вызывающее неравномерное распределение дисперсной фазы в аппарате.

В процессе декантации, по мере осаждения взвеси, повышается концентрация частиц в направлении от верхних к нижним слоям. Это способствует тому, что в локальной области сгущенной суспензии наблюдается стесненное осаждение частиц, сопровождающееся трением и взаимными столкновениями. При этом частицы более мелкие тормозят движение более крупных, а частицы больших размеров увлекают за собой частицы мелкой фракции, ускоряя их движение. В результате наблюдается тенденция к сближению скоростей осаждения частиц различных размеров; возникает коллективное, или флуктуационное осаждение частиц с близкими скоростями в каждом сечении аппарата [4].

При этом высота отдельных областей сгущенной суспензии изменяется во времени до момента полного расслоения неоднородной системы на осадок и осветленную жидкость. Это является следствием изменения скорости отстаивания  $v_{ост}$  во времени  $\tau$  (рисунок 1).

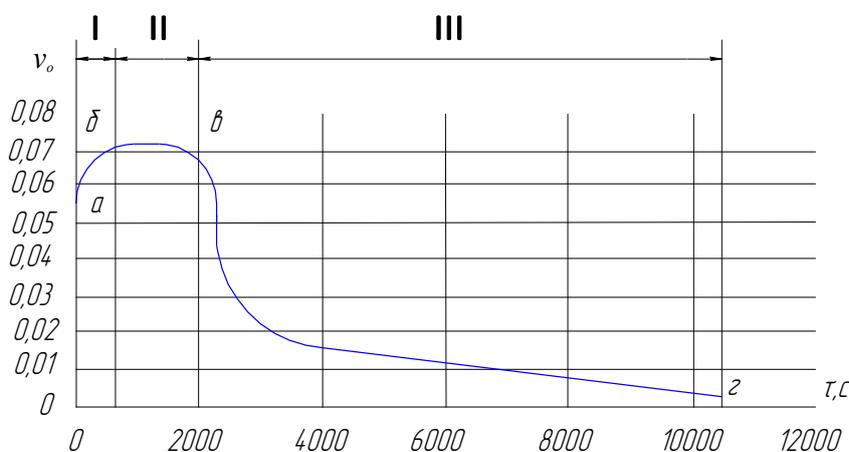


Рисунок 1. Зависимость скорости отстаивания частиц от времени

Figure 1. The dependence of the particles's sedimentation rate from the time

На первой стадии процесса декантации, в начале отстаивания, осаждаются преимущественно более крупные частицы, вызывающие наиболее интенсивное обратное движение жидкости. Однако по мере уменьшения концентрации этих частиц тормозящее влияние обратного тока жидкости ослабевает, и скорость отстаивания возрастает (отрезок  $ab$  на рисунок 1) до момента установления динамического равновесия между действующей силой и силой сопротивления жидкости. На второй стадии совместное осаждение частиц происходит с постоянной скоростью

(отрезок  $бв$  на рисунок 1). На завершающей третьей стадии процесса происходит уплотнение осадка, т. е. частицы располагаются близко друг к другу и вытеснение жидкости становится затруднительным. При этом процесс отстаивания протекает с уменьшающейся скоростью (отрезок  $вz$  на рисунок 1). Снижение скорости частиц при приближении к днищу аппарата объясняется тормозящим действием жидкости, вытесняемой осаждающимися частицами и движущейся в обратном направлении.

Скорость стесненного движения частиц меньше скорости свободного их осаждения. Это объясняется тем, что при стесненном осаждении частицы испытывают не только большое сопротивление жидкости, но и добавочное сопротивление, обусловленное трением и соударением частиц.

Для поэтапного отстаивания коэффициент сопротивления в ламинарной области при движении сферических твердых частиц можно определить по формуле [5]

$$\lambda = \frac{24}{\text{Re}} \left( 1 + \frac{3}{4} \text{Re} \right), \text{Re} < 0,4 \quad (1)$$

При  $\text{Re} < 1$  погрешность составляет меньше 6% и

$$\text{Re} = \frac{vd}{(1-\varphi)\mathcal{G}} \quad (2)$$

где  $\mathcal{G}$  – кинематическая вязкость, подаваемой суспензии в отстойник,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $d$  – диаметр частицы,  $\text{м}$ ;  $\varphi$  – средняя доля дисперсной фазы

Считаем, что частицы обладают сферической формой и перемещаются сверху вниз под действием гравитационной силы, направление которой образует с вертикальной осью  $Z$ , проходящей через центр сферы, некоторый угол  $\beta$  (рисунок 2). При этом имеет место не только вертикальное падение частиц со скоростью

$$v_e = -\frac{F}{6\pi a \mu} \left[ 1 + \frac{3a}{4l} (1 + \cos^2 \beta) \right], \quad (3)$$

но и горизонтальный дрейф в направлении оси  $X$  перпендикулярной  $Z$  со скоростью

$$v_z = \frac{F}{6\pi a \mu} \frac{3a}{4l} \sin \beta \cos \beta, \quad (4)$$

где  $a$  – радиус данной сферы,  $\text{м}$ ;  $F$  – гравитационная сила,  $\text{Н}$ ;  $\mu$  – вязкость дисперсионной среды;  $l$  – расстояние между центрами сфер,  $\text{м}$ .

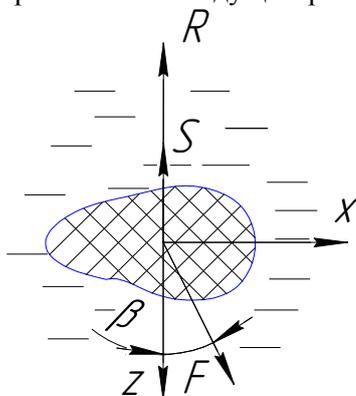


Рисунок 2. Схема к выводу уравнения осаждения частицы под действием силы тяжести

Figure 2. Output particle deposition equation by gravity (scheme)

Принимаем допущение, что когда размер взвешенных частиц много меньше размера аппарата, суспензию можно рассматривать в виде сплошной сферы со свойствами, отличными от свойств дисперсной фазы [4]. В общем случае данная среда по своим реологическим свойствам остается близкой к ньютоновской, но с несколько повышенной вязкостью по сравнению с дисперсионной средой. Рассмотрим эту вязкость в качестве эффективной вязкости  $\mu_e$ , которую соотнесем с вязкостью дисперсионной среды  $\mu$  в виде

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_e}{\mu}. \quad (5)$$

Данное соотношение представляет собой безразмерную эффективную вязкость

Величина  $\mu_e$  в основном определяется значением объемной концентрации дисперсной фазы  $\varphi$ .

Хаппелем и Бреннером было показано, что эффективная вязкость может быть связана с отношением скоростей свободного оседания одиночной частицы по закону Стокса и частиц в суспензии на основе использования величины корректирующего множителя в силе сопротивления  $\lambda$ .

Для безразмерной эффективной вязкости справедливо выражение вида

$$\bar{\mu} = (1-\varphi)^m \lambda, \quad (6)$$

где  $m = 2$  для двухскоростной модели, которая рассматривает систему как две взаимопроницающие сплошные фазы областей сгущенной суспензии со своими полями скорости.

Отношение скоростей стесненного и свободного движения в каждой из областей является некоторой функцией доли дисперсной фазы, что выражается уравнением [3]

$$\frac{v}{v_0} = f(\varphi) \quad (7)$$

Для определения скорости стесненного движения твердых и газовых частиц часто применяется эмпирическая формула, широко используемая в теории потока дрейфа

$$v = v_0 f(\varphi) \quad (8)$$

где  $v$  – скорость стесненного движения частиц дисперсной фазы,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $v_0$  – скорость движения одиночной частицы,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $f(\varphi)$  – эмпирическая функция;  $\varphi$  – средняя доля дисперсной фазы.

Функция  $f(\varphi)$  имеет вид

$$f(\varphi) = (1-\varphi)^n \quad (9)$$

Формула для отношения скоростей стесненного и свободного движения частицы,

связывающей безразмерную эффективную вязкость  $\bar{\mu}$  с долей твердых частиц в суспензии  $\varphi$

$$f(\varphi) = (1 - \varphi)^2 \bar{\mu} = (1 - \varphi)^2 (1 + 2,5\varphi + 12,5\varphi^2)^{-1} \quad (10)$$

На основе физической модели осаждения частиц процесса декантации с учетом формул (1)–(10) для рекуперации вторичных вод свеклосахарного производства вычислены значения безразмерной эффективной вязкости  $\bar{\mu}$  и функции  $f(\varphi)$  (таблица 1).

Данные значения позволяют получить зависимости в виде графиков изменения функции  $f(\varphi)$  от  $\varphi$  для процессов осаждения при различных значениях Рейнольдса.

На основе моделирования гравитационного осаждения частиц при стесненном движении в процессе очистки вторичных вод свеклосахарного производства и предложенной методики расчета определены по формулам (1)–(10) скорость осаждения и изменение функции  $f(\varphi)$  в зависимости от доли дисперсной фазы и переменного числа Рейнольдса при различном диаметре частиц (рисунок 3).

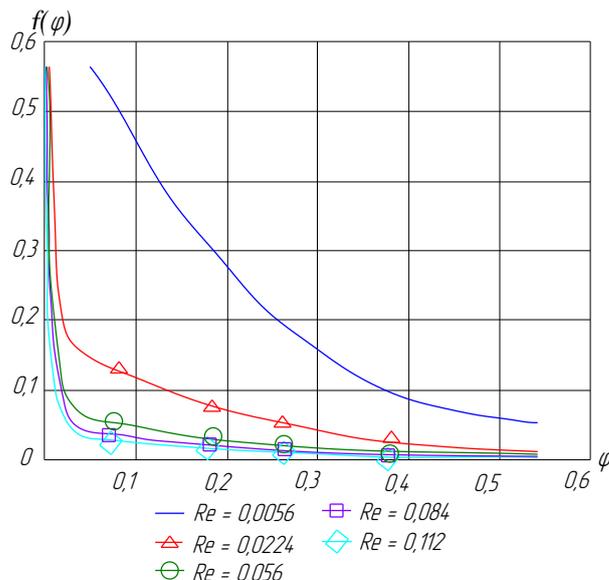


Рисунок 3. График изменения функции  $f(\varphi)$  от средней доли дисперсной фазы  $\varphi$  для процесса осаждения при различных значениях  $Re$

Figure 3. Schedule change functions  $f(\varphi)$  of the dispersed phase  $\varphi$  average fraction for the precipitation process at various values of  $Re$

Зависимости эффективной вязкости и скоростей от дисперсной фазы

Таблица 1.

Dependence of effective viscosity and velocity of the dispersed phase

Table 1.

Диаметр-частицы, мм The particle diameter, mm	Безразмерная эффективная вязкость $\bar{\mu}$ при различных значениях $\varphi$ The dimensionless effective viscosity for $\varphi$ different values				Отношение скоростей $f(\varphi)$ при различных значениях объемной концентрации дисперсной фазы $\varphi$ The speed ratio $f(\varphi)$ for different values of the volume concentration $\varphi$ dispersed phase			
	10	20	30	40	10	20	30	40
$d_{\min} = 0,05$	3486,24	2754,6	2109	1549,4	2824	1763	1033,4	558
$d_1 = 0,2$	898,3	709,8	543,4	399,2	728	454,3	266,3	144
$d_2 = 0,5$	362	285,8	218,8	161	293	183	107,2	58
$d_3 = 0,75$	246,24	195	149	109,4	199,5	124,8	73	39,4
$d_{\max} = 1$	188,2	148,7	114	83,6	152,4	95,2	55,86	30

Апробация модели с соотношениями (1)–(10) проведена для осаждения дисперсных частиц в производственных условиях ОАО «Елань-Коленовский сахарный завод» и показала адекватность полученных значений при ламинарном режиме гравитационного осаждения.

Полученные зависимости использованы для инженерного расчета модернизируемого оборудования процесса декантации при рекуперации вторичных вод свеклосахарного производства [6].

**Заключение**

Разработана эколого-ресурсосберегающая аппаратурно-технологическая схема линии рекуперации вторичных вод для комплексной технологии переработки сахарной свеклы и модернизация оборудования участка очистки транспортно-мочных вод свеклосахарного производства ОАО «Елань-Коленовский сахарный завод», предусматривающие повышение степени осаждения частиц [6], что способствует более качественной очистке транспортно-мочных вод и экономии воды при мойке сахарной свеклы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Калашников Г.В., Назаретян Д.В. Безотходная технология производства сухого картофельного пюре // Вестник ВГУИТ. 2015. № 3 (65). С. 50–54.
- 2 Arjen Y. H. Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability // Elsevier. 2015. P. 221–254
- 3 Трушин А.М., Дмитриев Е.А., Носырев М.А., Хусанов А.Е. и др. Обобщенный метод определения скорости ламинарного стесненного движения сферических твердых и газовых частиц в жидкостях // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. № 6. С. 668–671
- 4 Стабников В.Н., Лысянский В.М., Попов В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Агропромиздат, 1985. 510 с.
- 5 Федоров Н.Е. Методы расчетов процессов и аппаратов пищевых производств. М.: ВНИИПП, 1966. 294 с.
- 6 Калашников Г.В., Атисков И.М. Модернизация линии рекуперации вторичных вод // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2016. № 5 (13). С. 77–80.
- 7 Rossier M. et al. Energy-efficient noble metal recovery by the use of acid-stable nanomagnets // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2010. V. 49. № 19. P. 9355-9362.
- 8 Mikhlin Y. et al. Ultrafine particles derived from mineral processing: A case study of the Pb–Zn sulfide ore with emphasis on lead-bearing colloids // Chemosphere. 2016. V. 147. P. 60-66.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Геннадий В. Калашников** д. т. н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kagen5@yandex.ru  
**Иван М. Атисков** магистрант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nagi.soichero@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

**Геннадий В. Калашников** консультация в ходе исследования  
**Иван М. Атисков** написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 26.10.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 19.11.2016

REFERENCES

- 1 Kalashnikov G.V., Nazaretyan D.V. Waste-free production technology of dry mashed potatoes. *Vestnik VGUIT* [Proceedings VSUET], 2015, no. 3, pp. 50–54. (in Russian)
- 2 Arjen Y. H. Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability. Elsevier, 2015, pp. 221–254.
- 3 Trushin A.M., Dmitriev E.A., Nosyrev M.A., Khusanov A.E. et al. Generalized method for determining the speed of movement of the laminar constrained spherical solid particles and gases in liquids. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering] 2013, vol. 47, no. 6, pp. 668–671. (in Russian)
- 4 Stabnikov V. N., Lysyanskiy V. M., Popov V. D. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv [Processes and devices of food manufactures] Moscow, Agropromizdat, 1985. 510 p. (in Russian)
- 5 Fedorov N.E. Metody raschetov protsessov i apparatov pishchevykh proizvodstv [Methods of calculation of processes and equipment for food production] Moscow, VNIIPP, 1966. 294 p. (in Russian)
- 6 Kalashnikov G.V., Atiskov I.M. Modernization of the line of recovery of secondary waters. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya* [Technologies of food and processing industry of agrarian and industrial complex products of healthy food] 2016, no. 5, pp. 77–80. (in Russian)
- 7 Rossier M. et al. Energy-efficient noble metal recovery by the use of acid-stable nanomagnets. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, vol. 49, no. 19, pp. 9355-9362.
- 8 Mikhlin Y. et al. Ultrafine particles derived from mineral processing: A case study of the Pb–Zn sulfide ore with emphasis on lead-bearing colloids. *Chemosphere*, 2016, vol. 147, pp. 60-66.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Gennadii V. Kalashnikov** doctor of technical sciences, professor, machines and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kagen5@yandex.ru  
**Ivan M. Atiskov** master student, machines and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nagi.soichero@mail.ru

CONTRIBUTION

**Gennadii V. Kalashnikov** consultation during the study  
**Ivan M. Atiskov** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 10.26.2016

ACCEPTED 11.19.2015