Проведённые исследования показали, что наибольшее влияние на выход золотых наностержней оказывают концентрации зародышей золота $[Au]_{seed}$ и ионов серебра $[Ag^+]$. Концентрация ионов золота $[Au^{3+}]$ мало влияет на изменение геометрических параметров полученных частиц, однако при высоких концентрациях наравне с наностержнями образуется большое количество частиц неправильной формы, что свидетельствует о плохой селективности процесса.

Увеличение концентрации зародышей золота $[Au]_{seed}$ при постоянной концентрации ионов золота $[Au^{3+}]$ приводит к уменьшению длины наностержней.

При уменьшении концентрации ионов серебра $[Ag^+]$ происходит постепенное уменьшение длины наностержней.

Один из образцов наностержней использовался для подтверждения работоспособности метода неразрушающего контроля. Результаты эксперимента показывают, что при использовании оптических наномаркеров определённого размера и формы возможно обнаружить микротрещины и микроповреждения на поверхности металлических конструкционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. US 2009/0180587, Method of detecting fine surface defects. Pub. Date: Jul. 16, 2009.

2. Migoun NP and Delenkovskii NV. Improvement of Penetrant-Testing Methods // J. Eng. Phys. Therm. — 2009. — V. 82, Issue 4. — P. 734-742.

3. *Медведева М.Л.* Коррозия и защита оборудования при переработке нефти и газа: Учебное пособие для вузов нефтегазового профиля. — М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. — 312 с.

4. *Stuart D.A., Haes A.J., Yonzon C.R., Hicks E.M., Van Duyne R.P.* Biological applications of localized surface plasmonic phenomenae // IEE Proc. Nanobiotechnol. — 2005. — V. 152, № 1. — P. 13-32.

5. *Zeng S.* et al. A review on functionalized gold nanoparticles for biosensing applications // Plasmonics. — 2011. — V. 6, № 3. — P. 491-506.

6. Creighton JA, Eadont DG (1991) Ultraviolet–visible absorption spectra of the colloidal metallic element // J. Chem Soc Faraday Trans 87:3881. doi:10.1039/FT9918703881.

7. *Lu X., Rycenga M., Skrabalak S.E., Wiley B., Xia Y.* (2009) Chemical synthesis of novel plasmonic nanoparticles // Annu Rev Phys Chem 60:167–192. doi:10.1146/annurev.physchem.040808.090434.

8. *Tapan K. Sau, Catherine J.* Murphy Seeded High Yield Synthesis of Short Au Nanorods in Aqueous Solution // Langmuir. — 2004. — № 20. — P. 6414-6420.

УДК 655.63.048.001.24

Определение гидравлического сопротивления и эффективности массообменных тарелок

М.Ю. БЕЛЯЕВСКИЙ, Г.Ю. КОЛМОГОРОВ, А.И. ЗАИКА, Д.М. БЕЛЯЕВСКИЙ, Н.М. БАБАРЫКИН

МГМУ (МАМИ); ЗАО «ПИРО»

Многочисленные исследования показывают, что в процессах ректификации имеется связь между КПД массообменного устройства и его полезным сопротивлением, которое определяют как сумму сопротивлений, способных интенсифицировать тепло- и массообменный процессы [1,2].

Полное гидравлическое сопротивление ΔP, Па, находят по формуле

$$\Delta P = \Delta P_{ст} + \Delta P_{с} + \Delta P_{э} + \Delta P_{тр} + \Delta P_{у} + \Delta P_{\sigma},$$

где $\Delta P_{ст}$ — сопротивление статического слоя жидкости; $\Delta P_{с}$ — сопротивление сухого массообменного устройства; $\Delta P_{э}$ — сопротивление, обусловленное взаимным обменом количеств движения между газом и жидкостью; $\Delta P_{тр}$ — сопротивление трения, возникающее при скольжении газа вдоль границы раздела фаз; $\Delta P_{у}$ — сопротивление, обусловленное изменением кинетической энергии системы в процессе контактирования фаз (эжекция пара жидкостью); ΔP_{σ} — сопротивление силам поверхностного натяжения.

Сопротивление $\Delta P_{ст}$ зависит от высоты барботируемого слоя жидкости, и оно должно быть как можно меньше во избежание напрасных затрат энергии на его преодоление [3]. Его величина всегда положительна:

$$\Delta P_{ст} = \rho_{ж}\, g\, h_{ж} + \frac{\rho_{ж}\, g\, L_V}{3600 w_{ж}},$$

где $w_{ж}$ — скорость движения жидкости по полотну тарелки для прямоточных устройств без переливной планки, которую можно определять по известной формуле

$$w_{ж} = \varphi\sqrt{2\rho'_{ж}\, g\, h_V},$$

где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м^3; $\rho'_{ж}$ — относительная плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести, м/с^2; $h_{ж}$ — минимальная высота

слоя жидкости, обусловленная конструкцией тарелки; L_V — удельная жидкостная нагрузка на тарелке, м³/(м·ч) (на насадке, м³/(м²ч)); ϕ — коэффициент скорости для сливных устройств принятых форм и размеров; h_V — минимальная высота столба жидкости в кармане, м.

Сопротивление ΔP_c характеризует конструктивные особенности массообменного устройства и не влияет на интенсивность массообмена. Изменяя конструкцию массообменного устройства, можно добиться существенного уменьшения его габаритов. Величина ΔP_c всегда положительна. Сопротивление сухой тарелки обычно рассчитывают по известной формуле Дарси-Вейсбаха. Исследования прямоточных тарелок (клапанных, из просечно-сжатого или вытяжного листа и т.п.) показало: при скорости газа в полном сечении колонны свыше 3 м·с$^{-1}$ характер кривой зависимости $\Delta P_c = fW_п$ изменяется. Движущийся над полотном тарелки поток газа эжектирует газ из-под тарелки и уменьшает сухое сопротивление, для расчёта которого предложено уравнение

$$\Delta P_c = K \sum \xi \frac{\rho_п}{2S_0^2} w_п^2,$$

где K — коэффициент снижения сопротивления сухой тарелки при движении жидкости по ней с начальной скоростью, вызывающей разрежение под тарелкой; $\sum\xi$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений по пути прохождения газа (пара); $\rho_п$ — плотность пара, кг·м$^{-3}$; S_0 — относительное свободное сечение тарелки; $w_п$ ($w_г$) — скорость пара (газа) в полном сечении колонны, м·с$^{-1}$.

Сопротивление $\Delta P_э$ влияет на интенсивность массообмена и может быть величиной как положительной, если газ передаёт импульс жидкости (Г → Ж), так и отрицательной, если жидкость передаёт импульс газу (Ж → Г):

$$\Delta P_э = \frac{\rho_п}{360 S_0 d_0 \rho'_ж} L_V w_п,$$

где d_0 — эквивалентный диаметр отверстий тарелки, м.

Если обмена импульсом нет ($w_г = w_ж$), то $\Delta P_э = 0$.

Сопротивление $\Delta P_{тр}$ может быть знакопеременной величиной в зависимости от соотношения скоростей движения фаз. На интенсивность массообмена эта величина влияния не оказывает:

$$\Delta P_{тр} = -\frac{A \mu S}{2 d_0^2 S_0} (\overline{w}_п - \overline{w}_ж),$$

где A — эмпирический коэффициент; μ — динамическая вязкость газа (пара), кг·м$^{-1}$·с$^{-1}$; S — длина канала, по которому газ (пар) движется в барботируемом слое жидкости, м (обычно она равна высоте этого слоя); $w_ж$ — скорость жидкости на полотне тарелки, м·с$^{-1}$.

Для упрощения расчётов струйных массообменных тарелок, где угол наклона просечки к полотну тарелки α меньше предельной величины, и жидкость при движении прилипает к полотну тарелки, т.е. cosα = 1, разность $\overline{w}_п - \overline{w}_ж$ можно заменить величиной $w_п$.

Сопротивление $\Delta P_у$ влияет на интенсивность массообмена и может быть величиной знакопеременной: положительной, если газ передает энергию жидкости (Г → Ж), отрицательной, если жидкость передаёт энергию газу (Ж → Г), либо равной нулю, если обмена энергией нет ($w_г = w_ж$):

$$\Delta P_у = -\frac{22,4 \rho_п^2}{3,6 \cdot 10^6 M \mu (S_0)^2 \rho'_ж} L_V w_п^2,$$

где M — средняя молекулярная масса газа (пара), кг·кмоль.

Сопротивление $\Delta P_σ$ обычно мало и при дальнейшем анализе им можно пренебречь:

$$\Delta P_σ = 4\sigma / d_0,$$

где σ — поверхностное натяжение на границе раздела фаз, кг·с$^{-2}$.

Полное сопротивление для массообменного устройства можно записать в виде:

$$\Delta P = \rho_ж g h_ж + \frac{\rho_ж g}{3600 w_ж} L_V + K \sum \xi \frac{\rho_п}{2S_0^2} w_п^2 + \frac{\rho_п}{360 S_0 d_0 \rho'_ж} L_V w_п - \frac{A \mu S}{2 d_0^2 S_0} w_п - \frac{22,4 \rho_п^2}{3,6 \cdot 10^6 M \mu S_0^2 \rho'_ж} L_V w_п^2.$$

На **рис. 1** приведена зависимость полного гидравлического сопротивления тарелки из основе просечно-сжатого листа, испытанной на холодном стенде, от скорости потока газа.

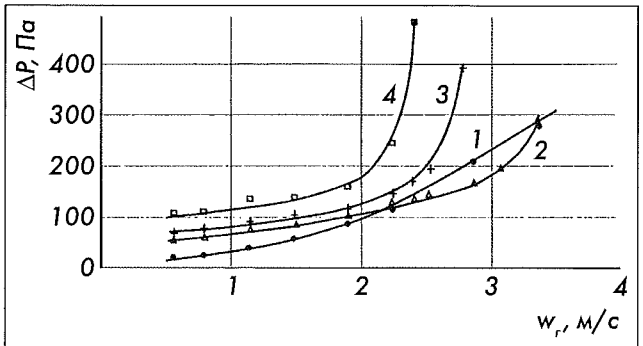


Рис. 1. Зависимость полного гидравлического сопротивления ΔP тарелки от скорости газа $w_г$, когда величина L_V (м³·м$^{-1}$·ч$^{-1}$) принимает значения 0; 3,25; 9,0; 19 (кривые 1-4 соответственно)

При скорости газа от 2,25 до 3,25 м·с$^{-1}$ сопротивление сухой тарелки превышало сопротивление орошаемой тарелки при L = 3,25 м³·м$^{-1}$·ч$^{-1}$. Это объясняется явлением эжекции, возникающем при определённом соотношении потоков газа и жидкости и обусловленным специфической конструкцией

тарелки. Импульсы скорости газа и жидкости суммируются, так как имеют одно направление, и жидкость движется ускоренно, создавая в последующем ряду просечек разрежение по отношению к подводимому газу (пару).

При этом скорость жидкости, движущейся на тарелке в горизонтальном направлении, может превышать как скорость газа, движущегося под тарелкой, так и скорость газа в щелях просечного листа. Следовательно, при определенном соотношении нагрузок жидкость на тарелке может проскальзывать относительно газа, поэтому сопротивления $\Delta P_э$ и $\Delta P_{тр}$ имеют отрицательные значения.

При оборудовании тарелки из просечно-сжатого листа жалюзийным отбойником производительность тарелки увеличивается более чем на 10%.

На **рис. 2** показана схема тарелки на основе просечно-сжатого листа, оборудованной жалюзийным отбойником на «холодном» стенде. Отбойник позволяет направлять вспененную жидкость в карман тарелки. Унос жидкости на тарелке без отбойника начинается благодаря набеганию струй на противоположную стенку с большей скоростью, вспенивая её в кармане, а также отбрасыванию на вышележащую тарелку. Отбойник также позволяет снизить гидравлическое сопротивление. На **рис. 3а** приведены зависимости уноса жидкости (e, %) от F-фактора для тарелки из просечно-сжатого листа без отбойника и оборудованной жалюзийным отбойником (**рис. 3б**). На **рис. 4** показан просечно-сжатый лист (32% свободного сечения).

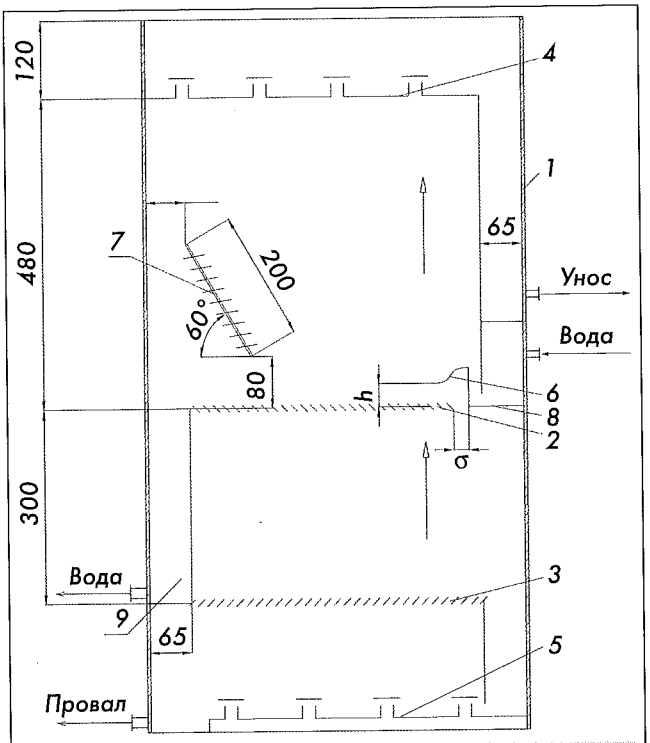
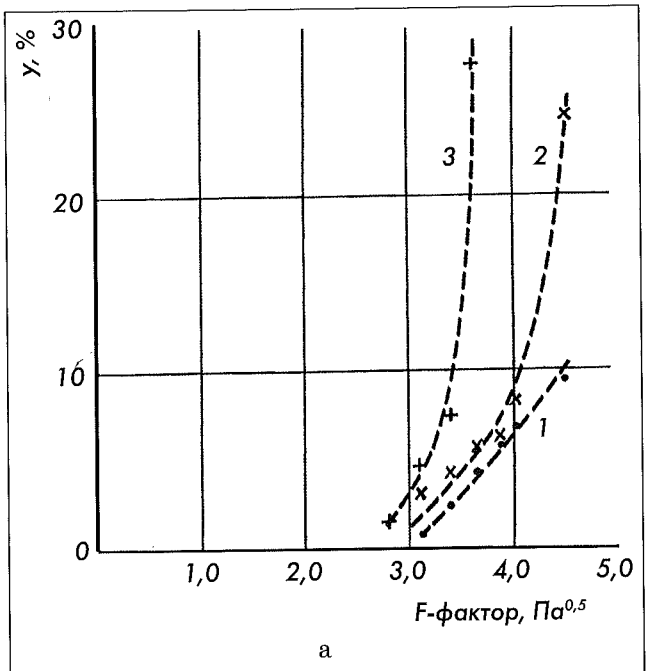
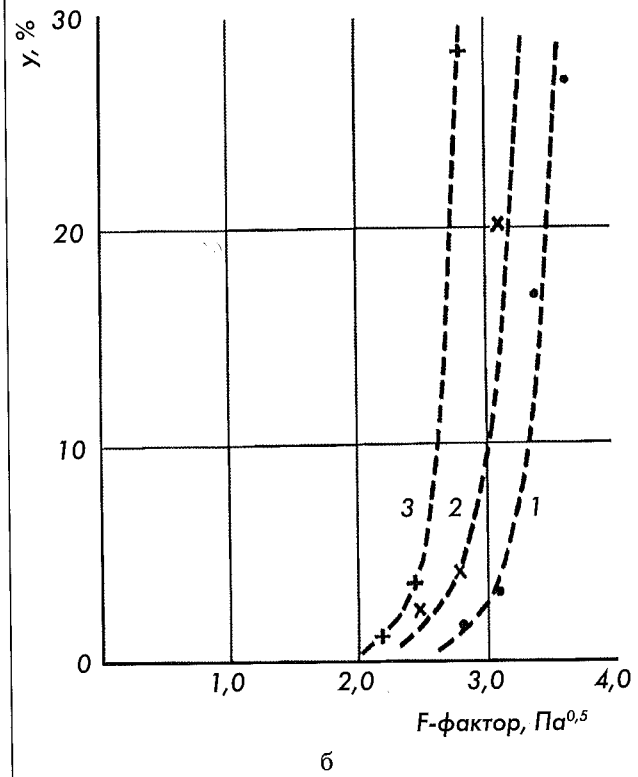


Рис. 2. Схема установки тарелки в холодном стенде:
1 — колонна; 2 — рабочая тарелка; 3 — распределительная тарелка; 4 — тарелка для сбора уноса жидкости; 5 — тарелка для сбора провала жидкости; 6 — водослив; 7 — жалюзийный отбойник; 8, 9 — приёмный и сливной карман соответственно



а



б

Рис. 3. Зависимость уноса жидкости от F-фактора для тарелки из просечно-сжатого листа без отбойника (а) и оборудованной жалюзийным отбойником (б):
1 — L_V = 6,5 м³/(м·ч); 2 — L_V = 12,5 м³/(м·ч); 3 — L_V = 25,5 м³/(м·ч)

На **рис. 5** приведены зависимости полного гидравлического сопротивления и КПД от F-фактора скорости пара для тарелки диаметром 1200 мм, выполненной из просечно-сжатого листа и испытанной на горячем стенде в режиме полного орошения на смеси «толуол–ортоксилол». КПД тарелки при испытаниях рассчитывали по известным формулам Фенске-Андервуда и Мерфри. Затем данные эксперимента сравнивали с данными расчёта гидродина-

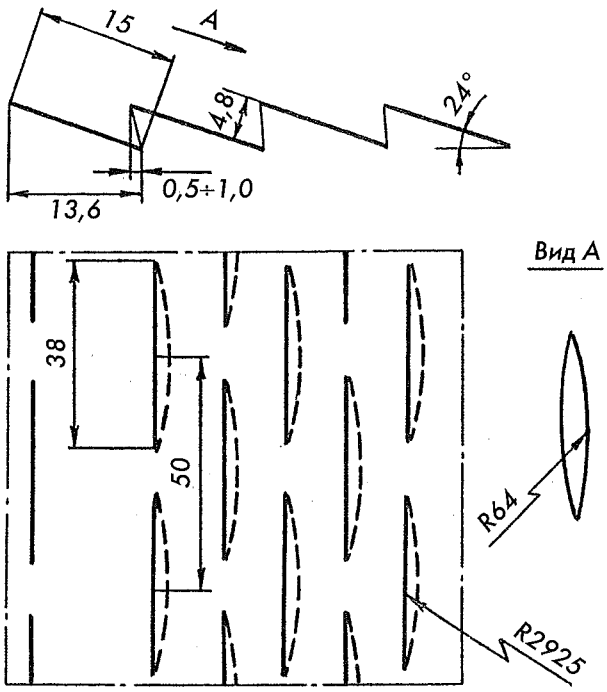


Рис. 4. Просечно-сжатый лист

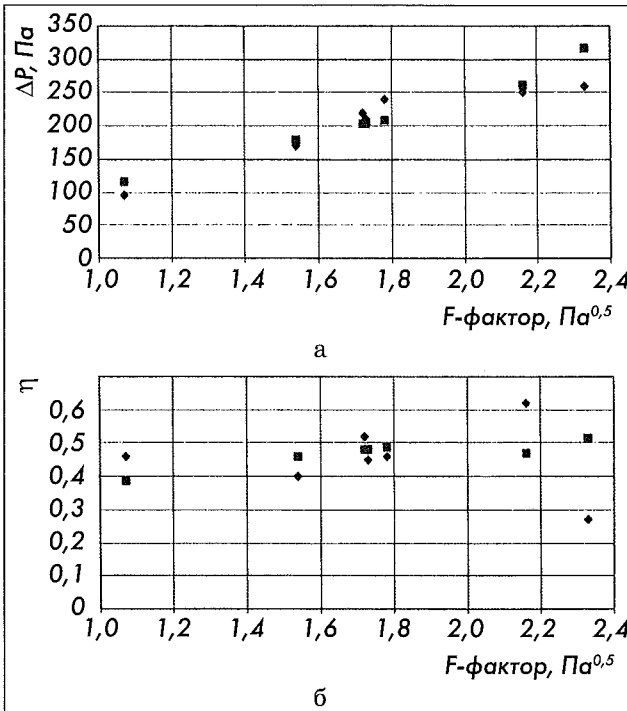


Рис. 5. Зависимость полного гидравлического сопротивления тарелки диаметром 1200 мм (а) и её КПД (б) от F-фактора скорости пара, $F = w_п$:

♦ — экспериментальные данные; ■ — расчётные данные

мического КПД по предложенной авторами методике [3] (далее «расчётный КПД»).

В **табл. 1** приведены экспериментальные и расчётные значения полного гидравлического сопротивления и КПД тарелки из просечно-сжатого листа, полученные при испытаниях на «горячем» стенде.

Согласно упомянутой выше методике введено понятие полезного сопротивления $\Delta P_{плз}$, равного сумме сопротивлений, способствующих интенсификации массообменного процесса:

$$\Delta P_{плз} = \Delta P_э + \Delta P_у.$$

Таблица 1

Гидродинамические и массообменные параметры тарелки из просечно-сжатого листа

F	$w_п$ ($w_г$)	L_V	ΔP		η	
			эксперимент	расчёт	эксперимент	расчёт
1,07	0,55	15,1	95	116	0,46	0,386
1,54	0,75	21,7	170	179	0,4	0,46
1,72	0,8	24,5	220	203	0,52	0,481
2,33	1,1	33,0	260	317	0,27	0,514
1,78	0,81	25,2	240	209	0,46	0,486
2,16	1,06	29,5	250	262	0,62	0,471
1,73	0,8	24,5	210	204	0,45	0,481

F — фактор скорости газа, $Па^{0,5}$; $w_п$ ($w_г$) — скорость пара (газа), $м \cdot с^{-1}$; L_V — удельная жидкостная нагрузка, $м^3 \cdot м^{-1} \cdot ч^{-1}$; ΔP — полное гидравлическое сопротивление, Па; η — КПД.

Анализируя расчётные и экспериментальные данные по сопротивлению и эффективности тарелки (см. табл. 1), можно предположить, что в процессе массообмена участвуют только те составляющее полного сопротивления, определяющие формулы которых содержат скорость газа (пара) и удельную жидкостную нагрузку, т.е. это составляющие $\Delta P_э$ (со знаком «плюс») и $\Delta P_у$ (со знаком «минус»).

Тогда гидродинамический КПД массообменного устройства находят по формуле

$$\eta = \Delta P_{плз}/\Delta P.$$

Для тарелки из просечно-сжатого листа КПД составит

$$\eta = (\Delta P_э/\Delta P) - (\Delta P_у/\Delta P).$$

В общем случае КПД массо-обменного устройства рассчитывается по формуле

$$\eta = (\Delta P_э/\Delta P) \pm (\Delta P_у/\Delta P),$$

причём в правой части ставится знак «плюс», если энергия передаётся от пара к жидкости, и знак «минус», если наоборот.

Если явление эжекции на тарелке отсутствует или нет направленного прямотока, то составляющие $\Delta P_у$ и $\Delta P_{тр}$ практически незначимы, так что ими можно пренебречь. Поэтому на эффективность клапанных, колпачковых и прочих барботажных тарелок будет влиять только сопротивление $\Delta P_э$. Но эта составляющая, возможно, будет иметь более сложный вид, так как необходимо учитывать весь слой жидкости на тарелке, и при этом возможны байпасные потоки, способные повысить эффективность массообмена и гидравлическое сопротивление.

Этим объясняется резкое увеличение КПД (до 0,62) тарелки из просечно-сжатого листа при F = 2,15 $Па^{0,5}$, когда начинают работать отбойники над

полотном тарелки, а жидкость в результате её набегания на стенку колонны с большой скоростью в области сливного кармана отбрасывается на полотно тарелки. Несмотря на то, что ΔP_y отрицательно сказывается на КПД тарелки, эта составляющая также понижает полное сопротивление, поэтому в дальнейшем при конструировании массообменных устройств необходимо наиболее полно учитывать ΔP_y в конкретном процессе массообмена.

Для прямоточных тарелок с переливными планками слой жидкости уменьшается с увеличением паровых (газовых) нагрузок. При достаточно высоких нагрузках по газу ($F > 1{,}5$ $Па^{0,5}$) практически вся жидкость находится в плёнке, движущейся над тарелкой. Кроме того, удельная нагрузка по жидкости на таких тарелках не будет соответствовать удельной нагрузке, обычно трактуемой как L_V на переливной планке.

На скоростных струйных тарелках, где переливная планка отсутствует (например тарелки большого свободного сечения, выполненные из просечно-сжатого листа), удельная нагрузка на переливной планке L_V будет такой же, как и на тарелке, поэтому

$$\Delta P_{ст} = \frac{\rho_ж g L_V}{3600 K w_ж}.$$

В случае клапанных тарелок с переливной планкой возникают значительные затруднения в определении удельной жидкостной нагрузки на тарелке в различных режимах. Для определения этого параметра необходимы довольно трудоёмкие стендовые испытания.

При этом принимают:

$$L_V = L_V^p = L_V^{пл} \cdot K,$$

где L_V^p — расчётная удельная жидкостная нагрузка на тарелке, ($м^3 \cdot м^{-1} \cdot ч^{-1}$); $L_V^{пл}$ — удельная жидкостная нагрузка на планке, ($м^3 \cdot м^{-1} \cdot ч^{-1}$); K — коэффициент, учитывающий наличие байпасных потоков на тарелке. Тарелка, оснащённая трапециевидными клапанами с переливной планкой, была испытана на горячем стенде ВНИИнефтемаша на смеси «толуол–о-ксилол» в режиме полного орошения (**табл. 2**).

Таблица 2

Гидродинамические и массообменные параметры тарелки с трапецевидными клапанами с переливной планкой

F	$w_п$ ($w_г$)	L_V		ΔP		η	
		$L_V^{пл}$	L_V^p	эксперимент	расчёт	эксперимент	расчёт
0,64	0,303	8,6	146,2	589	600,5	0,622	0,634
0,85	0,405	11,8	118	600	595	0,591	0,657
1,08	0,515	15,0	90	581	552	0,669	0,645
1,5	0,715	20,7	83	619	671	0,727	0,61
1,77	0,841	24,5	73,5	713	744	0,526	0,528
1,97	0,936	27,2	95,2	956	927	0,532	0,579
2,31	1,102	32,1	224,7	1901	1759	0,514	0,646

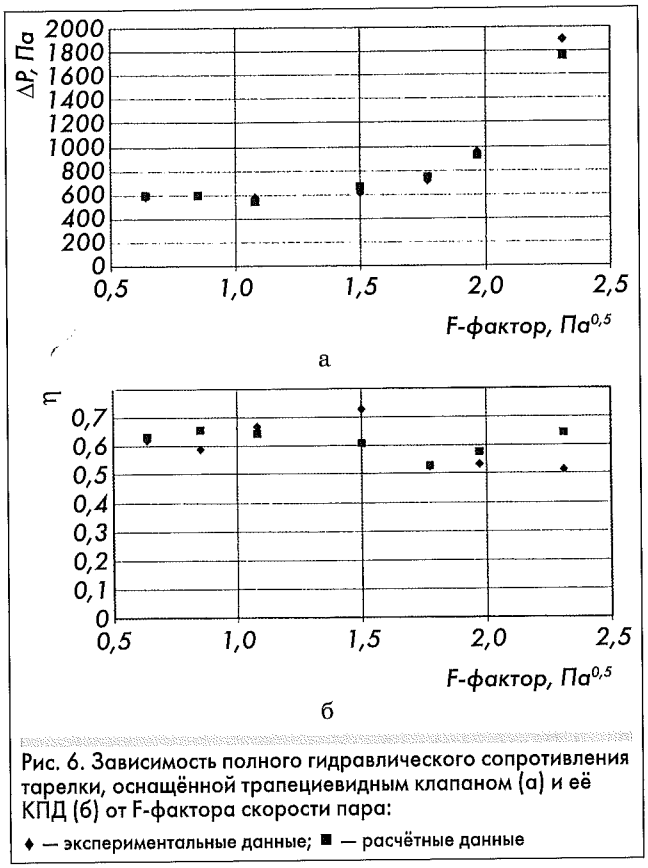


Рис. 6. Зависимость полного гидравлического сопротивления тарелки, оснащённой трапециевидным клапаном (а) и её КПД (б) от F-фактора скорости пара:

♦ — экспериментальные данные; ■ — расчётные данные

На **рис. 6** приведены зависимости полного гидравлического сопротивления и КПД для тарелки, оснащённой трапециевидным клапаном с переливной планкой, от F-фактора скорости пара.

В **табл. 3** приведены данные испытаний клапанной тарелки большого живого сечения (ТБЖС) на горячем стенде. Поскольку тарелка прямоточная, без переливной планки, $L_V^{пл} = L_V^p$.

Таблица 3

Гидродинамические и массообменные параметры ТБЖС

F	$w_п$ ($w_г$)	L_V	ΔP		η	
			эксперимент	расчёт	эксперимент	расчёт
0,886	0,421	10,155	206	212	0,54	0,63
1,286	0,611	14,7	197	157	0,585	0,53
1,511	0,718	17,3	225	218	0,559	0,52
1,905	0,905	21,8	262	260	0,604	0,688
2,251	1,059	26,1	327	332	0,657	0,747
2,621	1,245	30,05	384	412	0,717	0,7
2,916	1,395	33,4	464	481	0,747	0,75
3,388	1,607	39	776	708	0,653	0,69

На **рис. 7** представлены зависимости полного гидравлического сопротивления и КПД от F-фактора скорости пара для ТБЖС.

Приведённые для различных типов массообменных устройств уравнения полного гидравлическо-

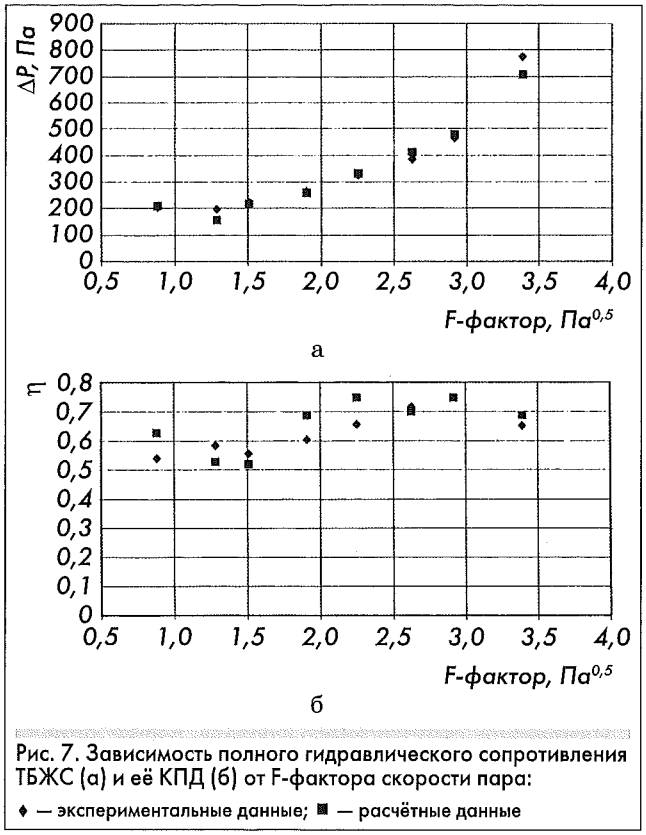


Рис. 7. Зависимость полного гидравлического сопротивления ТБЖС (а) и её КПД (б) от F-фактора скорости пара:
♦ — экспериментальные данные; ■ — расчётные данные

го сопротивления и гидродинамического КПД дают возможность моделирования тарелок и насадок с заранее запланированными параметрами. Например, уравнения, приведённые авторами, показывают увеличение эффективности устройства за счёт уменьшения эквивалентного диаметра d_0 или уменьшения КПД и сопротивления при углублении вакуума.

В разработках ведущих зарубежных фирм (Sulzer и др.) отмечено уменьшение эффективности при углублении вакуума в процессе переработки мазута.

С учётом возможных погрешностей измерения параметров, характеризующих работу стенда, можно считать достигнутую согласованность экспериментальных результатов с расчётными вполне удовлетворительной.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляевский М.Ю., Беленов Е.А.* Гидродинамика и перспективы развития просечных прямоточных тарелок. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1996. — 48 с. — (Тем. обзор).

2. *Беляевский М.Ю., Беленов Е.А.* и др. Определение эффективности массообмена на струйных тарелках // Нефтепереработка и нефтехимия. — 1998. — № 6.

3. *Беляевский М.Ю., Беленов Е.А.* Определение эффективности массообменных устройств с учетом гидравлического сопротивления // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2000. — № 10. — С. 46-55.

УДК 579.873.6.017.7

Способ биоремедиации почвы при загрязнении высоковязкой нефтью*

Д.А. Филатов, Л.И. Сваровская, Е.В. Гулая, Л.К. Алтунина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти СО РАН, г. Томск

Интенсивная добыча невозобновляемых ресурсов, а также продукты их переработки являются реальной угрозой существования природных экосистем. Загрязнение нефтью влияет на весь комплекс морфологических, физических, физико-химических, биологических свойств почв, определяющих их плодородие [1].

В результате аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, главным образом в процессе добычи и транспортировки, подвергаются загрязнению огромные территории. Присутствие нефтепродуктов в почве представляет существенную экологическую опасность, так как нарушается биогеоценоз вплоть до гибели живых организмов почвы при высоких концентрациях углеводородов. Для восстановления плодородия почв и переработки замазученных грунтов высокой степени нефтяного загрязнения необходимо создание эффективных методов их очистки [2].

Характерной особенностью современной нефтедобычи является увеличение доли трудноизвлекаемых запасов, к которым относятся, в частности, тяжёлые и высоковязкие нефти вязкостью 30 мПа·с

*Работа выполнена в рамках проекта НИР 39.2.6. «Комплексное биотестирование почв для оценки их загрязнения в районах нефтедобычи, создание способов биоремедиации и рекультивации почв, очистки водной среды, анализ экологических рисков, возникающих при транспортировке нефти» (2010-2012 гг.).